

# 均一液滴噴霧法による極小ボールベアリング用単分散金属球

## Mono-sized Metal Balls Produced by Uniform Droplet Spray for Miniature Ball Bearings

庄司 辰也\*  
Tatsuya Shoji

佐藤 光司\*  
Koji Sato

田村 庸\*  
Yasushi Tamura

極小ボールベアリングを対象用途とした，均一液滴噴霧法（UDS法）を用いた単分散金属球が，実用可能かを検討した。原材料をFe-B共晶合金系から選定した結果，Fe-Si-B-C合金において表面が平滑で引け巣がなく，現行軸受鋼相当の硬さを持つ単分散球を得た。試作したφ500 μmクラスの単分散球は標準偏差2.6 μm，平均真円度4.9 μmであり，断面平均硬さHVは829を示した。凝固球の圧碎試験を行い，破壊強度分布を軸受鋼と比較し，破面を観察した。また，Ball-On-Disc型摩擦試験を行い，乾燥空気中における摩擦摩耗特性を調べた。これらの検討結果から，本製法で作製した金属球はベアリングボールとして利用できる可能性を有することが判った。

Under the assumption of miniature ball bearings as a target application, the possibility of practically using mono-size metal balls (hereafter, “droplets”) —produced by the “uniform droplet splay” (UDS) method—was investigated. As a result of selecting the alloys from Fe-B eutectic system, in regards to Fe-Si-B-C alloy, droplets with hardness suitable for current ball-bearing steels but without apparent shrinkage cavities on their smooth surfaces were obtained. Prototype droplets with a diameter of 500 μm showed a standard deviation of 2.6 μm, an average circularity of 4.9 μm, and a cross-sectional hardness HV of 829. To compare their fracture strength with that of bearing steel, a compression test was carried out on the droplets, and their fracture surfaces were observed after the test. A ball-on-disk friction test in dry air was also conducted on the droplets in order to investigate their characteristics of friction and wear resistance. The results of these tests confirm that the droplets fabricated by the method described here can be practically applied as ball bearings.

●Key Word：ベアリングボール，単分散球，均一液滴噴霧法

●R&D Stage：Research

## 1. 緒言

極小ボールベアリング用鋼球の典型的な製法は，所望のボールサイズに近い径の伸線を切断し，球形に鍛造したあとバリ取り，研磨およびラッピングを経て完成するが，小径となるほどより細かい線材が必要となるため，ボール製造コストに占める加工コスト比率は増加する傾向にある。一方，半導体パッケージ実装に用いるはんだボールはベアリングボールと同様，粒径の揃った球体の集まり（単分散球）であるが，その製造には均一液滴噴霧法（以下，UDS法; Uniform Droplet Splay Method）と呼ばれるプロセスが用いられており，この方法は，数10 μmから1 mm程度の単分散球を原材料の溶湯から直接製造できることが特長である<sup>1) 2)</sup>。そこで，UDS法を用いてベアリングボール用のニアネットシェーブ凝固球を製造できれば，図1に示すように現在行われている加工工程のうち，伸線作製から熱処理までの工程を省略できることが予想される。なかで

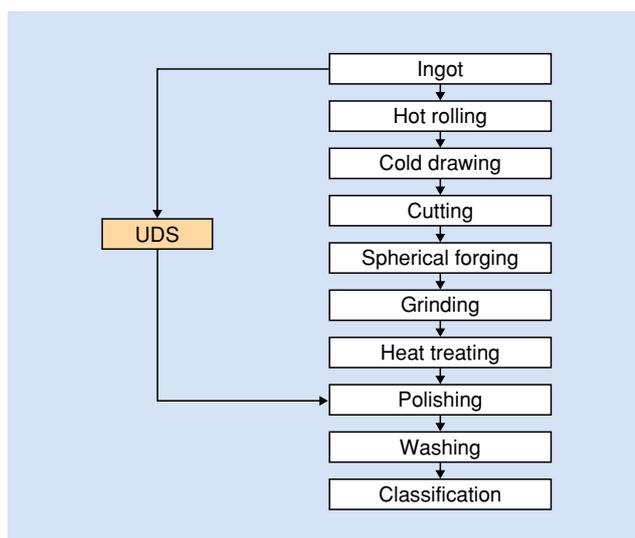


図1 UDS法による製造工程簡略化のイメージ

Fig. 1 Flow of ball-bearing production process simplified by UDS method

\* 日立金属株式会社 特殊鋼カンパニー

\* Specialty Steel Company, Hitachi Metals, Ltd.

も、細線切断片からの球形鍛造よりも1桁以上高いと推定される生産性の向上や、液体の表面張力を利用した球形凝固により、研磨加工の簡略化が期待できる。しかしUDS法は本質的に casting プロセスであるので、平衡状態図において広い固液共存領域を有する現行の軸受鋼を用いる場合には、凝固に伴う球の体積収縮が最終的な凝固部分に集中し、粗大な引け巣となることが懸念される。この引け巣を研磨工程で除去しようとしても材料の減失が大きくなり実用的でない。一方、ベアリングボールは転動による疲労、摩耗を受ける構造材料であるため、完成球の表面の硬さは少なくとも現行の軸受鋼程度（HRC62相当）は必要である。そこで本研究では、固液共存領域が狭いFe基共晶合金の中から、急冷凝固された状態で化合物による分散強化が期待できるFe-B共晶合金系に着目し、UDS法を用いて単分散球を作製した。これらの単分散球について、形状、硬さ、組織の均質性、真円度について評価し、ベアリングに適した組成として、Fe-Si-B-C合金を選定した。さらに、このFe-Si-B-C合金球について、圧縮試験、摩擦試験を行い、特性を現行の軸受鋼と比較し、ベアリングボールとしての適性について検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 均一液滴噴霧法（UDS法）

UDS法の概要を図2に示す。るつぼの底部中央にオリフィス（微小孔ノズル）がセットされている。溶解室と回収室とは相互に気密性が保持され、溶解室中の熔融金属に静水圧を加えることでオリフィスから回収室へ溶湯が射出される。射出された溶湯ジェットには、振動棒を介してオリフィス直上から鉛直方向の振動が伝えられ、規則的な脈動流として溶湯柱を一定体積の液滴に分断する。分断された液滴はその表面張力により球形となり、そのまま不活性ガス中で冷却、凝固し、単分散球となる。表1に単分散球の作製条件を示す。本実験では、粒径を350  $\mu\text{m}$ と500  $\mu\text{m}$ に設定し、基本組成としてFe-B共晶、Fe-Si-B共晶組成を

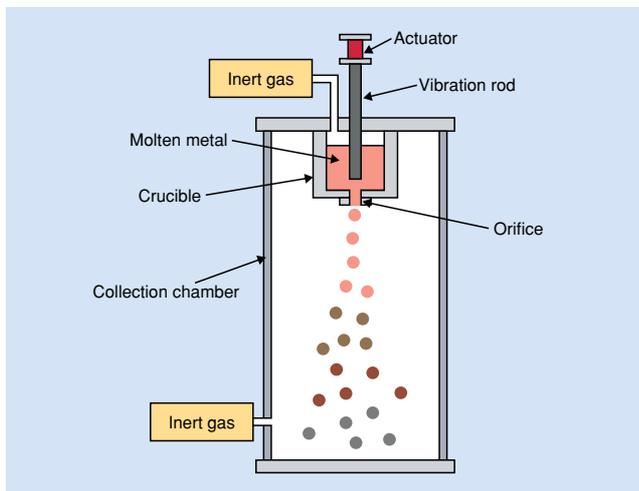


図2 UDS法の概要  
Fig. 2 Schematic illustration of UDS method

表1 単分散球の作製条件  
Table 1 Experimental conditions

Ball diameter ( $\mu\text{m}$ )	Orifice diameter (mm)	Dissolution temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Ejection pressure (MPa)	Quench medium
350	0.18	1,350	0.18	Argon
500	0.25	1,350	0.15	Argon

表2 UDS法で作製した単分散球  
Table 2 Mono-size droplets produced by UDS method

Sample No.	Composition (mass %)				Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Hardness HV0.02	Identified phases by XRD
	Fe	Si	B	C			
(a)	Bal	—	4.0	—	350	875	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>3</sub> B, Fe <sub>23</sub> B <sub>6</sub>
(b)	Bal	5.0	2.5	—	350	701	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>2</sub> B
(c)	Bal	5.0	2.5	—	500	691	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>2</sub> B
(d)	Bal	5.0	2.5	0.6	500	829	$\alpha$ -Fe, Fe <sub>2</sub> B, Fe <sub>3</sub> (B,C)

表3 比較材の完成球  
Table 3 Comparison of completed droplets with commercial materials

Material	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Hardness HV0.02	Grade
SUJ2	500	800	JIS Grade20
SUS440C	500	754	

選定した4種類の試料を作製した。また、試料の1種には、硬さを調整するためCを添加した。作製した単分散球の組成、粒径、硬さ、XRD定性分析結果を表2に示す。さらに、凝固組織の熱的安定性を調べるため、Cを添加した試料について1 h 恒温熱処理を行った。

### 2.2 圧碎試験

作製した球の静的荷重特性を評価するため、圧碎試験により球に破壊を生じる限界荷重を測定した。図3に試験の概要を示す。同じ寸法の2個の球を重ねた接点が破壊の起点となるように、円錐穴の治具を用いて球をセットした。インストロン型万能試験機を用い、クロスヘッド速度は0.1 mm/minとした。荷重が低下した時点で破断とみなし、破断荷重を各サンプル20点採取した。試験は表2に示す作製した球のうち、ボールベアリング用途に必要なとされる現行の軸受鋼程度（HRC62相当）以上の硬さを示した $\phi$ 500  $\mu\text{m}$ のFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料(d)）と、表3に示す比較材2種（SUJ2およびSUS440C）について行った。

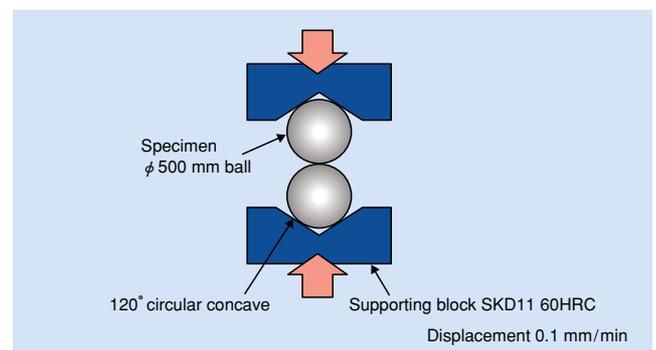


図3 圧縮試験の概要  
Fig. 3 Schematic illustration of compression test

## 2.3 摩擦試験

CSM社製ナノトライボメーターを用いてBall-On-Disc型摩擦試験を行った。図4に試験の概要を示す。常温乾燥空气中（25℃，54～60%RH）で速度1mm/s，1mm・200往復，荷重400mN，相手材は#14000仕上げのSUS420J2ディスクを用いてスクラッチ試験を行った。摩擦係数の値は往路，復路それぞれの摩擦係数の極大値を平均して求めた。試験後の球および相手材を走査電子顕微鏡で観察し，球の摩耗面積の相当円直径から摩耗体積および比摩耗量を算出した。試験は表2に示す作製した球のうちφ500μmのFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料(d)）と，表3に示す比較材2種（SUJ2およびSUS440C）について行った。

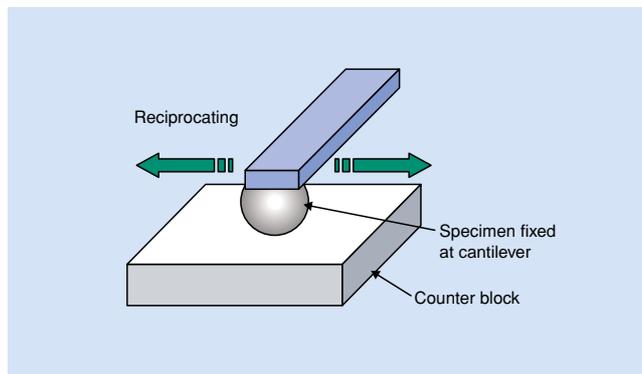


図4 摩擦試験の概要  
Fig. 4 Schematic illustration of friction test

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 各種Fe-B基合金球の評価と組成選定

前述のUDS法を用いて，表2に示す単分散球を作製した。図5に単分散球の外観を示す。φ350μmのFe-4B球（試料(a)）では，大部分の球の表面は平滑であったが，一部の球に引け巣による凹部が多数見られた。Fe-Si-B基合金球3種（試料(b)(c)(d)）では，表面にデンドライト（樹枝状結晶）組織が見られるが，引け巣はなく良好な球形を呈していた。図6に単分散球の断面組織を示す。φ350μmのFe-4B球（試料(a)）の凹部のある球は球表面に向かってデンドライトが成長しており，そのアーム間が凹部となっており，過冷された液滴からの典型的な結晶成長によるもの<sup>3)</sup>と推定される。一方，φ350μmのFe-5Si-2.5B球（試料(b)）では，デンドライトが微細な網目状に不規則な方向に成長している。φ500μmのFe-5Si-2.5B球（試料(c)）では，φ350μmの試料(b)に比べデンドライト組織が粗くなっており，粒径が大きくなったことで冷却速度が低下した場合の現象と考えられる。Cを添加したφ500μmのFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料(d)）では，デンドライトのアームが不明瞭になっている。

これらの観察結果と，表2に示した試料の硬度測定結果とを照合すると，φ350μmのFe-4B球（試料(a)）は形状に不良が多く，φ350μmのFe-5Si-2.5B球（試料(b)）とφ500μmのFe-5Si-2.5B球（試料(c)）はφ350μmの

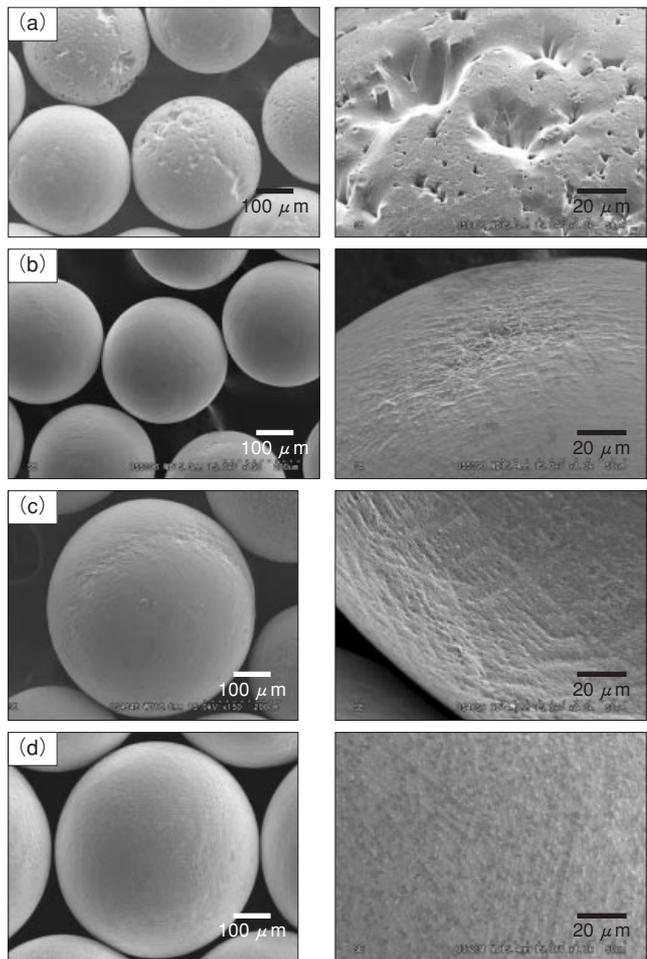


図5 単分散球の外観  
(a) φ350μm Fe-4B球 (b) φ350μm Fe-5Si-2.5B球  
(c) φ500μm Fe-5Si-2.5B球 (d) φ500μm Fe-5Si-2.5B-0.6C球  
Fig. 5 SEM images of the (a) φ350μm Fe-4B droplet, (b) φ350μm Fe-5Si-2.5B droplet, (c) φ500μm Fe-5Si-2.5B droplet, and (d) φ500μm Fe-5Si-2.5B-0.6C droplet

Fe-4B球（試料(a)）に比べて形状は良好であるが硬さが低く，HV 690～700（HRC59相当）である。一方，Cを添加したφ500μmのFe-5Si-2.5B-0.6% C球（試料(d)）の硬さはHV 829（HRC65相当）を示し，緒言で述べた現行の軸受鋼程度の硬さ（HRC62相当）に達していた。

そこで，Fe-5Si-2.5B-0.6C球（試料(d)）について，Cの添加が球の硬さに及ぼす影響について調べた。まず，X線回折（X-Ray Diffraction: XRD）により定性分析を行った結果を見ると，表2に示すように，Fe-5Si-2.5B-0.6C球（試料(d)）の成分はα-Fe，Fe<sub>2</sub>Bが主であり，加えてFe<sub>3</sub>(B,C)が同定された。組織の観察結果と照合すると，作製したFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料(d)）はα-FeデンドライトとFe-BあるいはFe-B-C化合物の共晶組織であると考えられる。次に，組織の熱的安定性を調べるため，図7に300～900℃で各1h恒温熱処理したFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料(d)）の硬さを示す。球の硬さは450～600℃で低下しはじめ，750℃でHV 600程度まで低下した。図8に300～900℃で各1h恒温熱処理したFe-5Si-2.5B-0.6C球

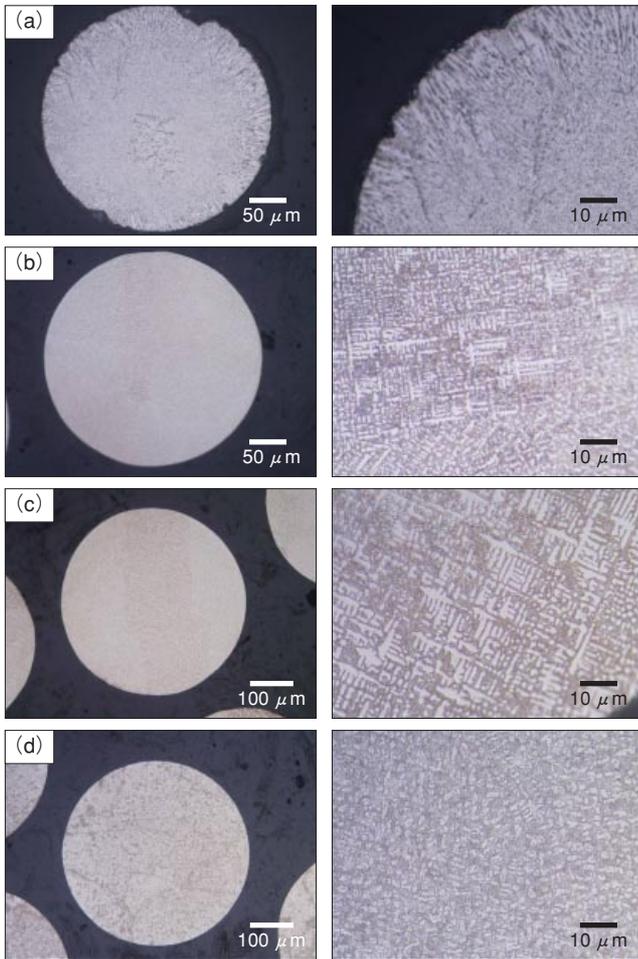


図6 単分散球の断面組織  
 (a)  $\phi$  350  $\mu\text{m}$  Fe-4B球 (b)  $\phi$  350  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B球  
 (c)  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B球 (d)  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C球  
 Fig. 6 Cross-sections of the (a)  $\phi$  350  $\mu\text{m}$  Fe-4B droplet, (b)  $\phi$  350  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B droplet, (c)  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B droplet, and (d)  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C droplet

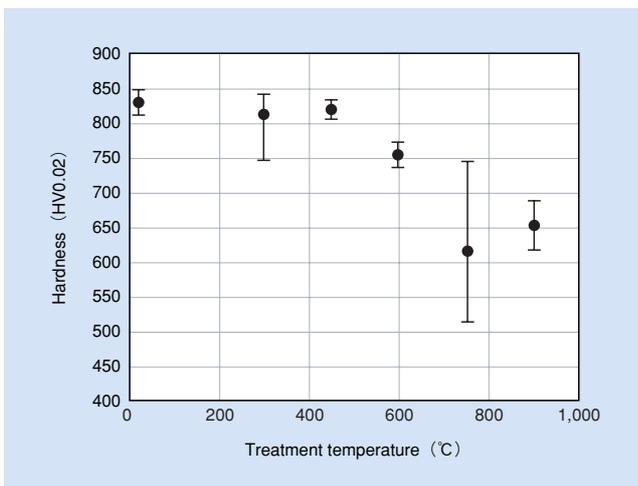


図7 熱処理した  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C球の硬さ (n=10pcs)  
 Fig. 7 Hardness behaviors of  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C balls at each heat-treated temperature

(試料 (d)) の断面組織を示す。熱処理温度が高くなるほど、化合物が粒成長し粗大化している。一般的な炭素鋼の焼戻し温度程度 ( $\sim 300$   $^{\circ}\text{C}$ ) では硬さの低下が起こら

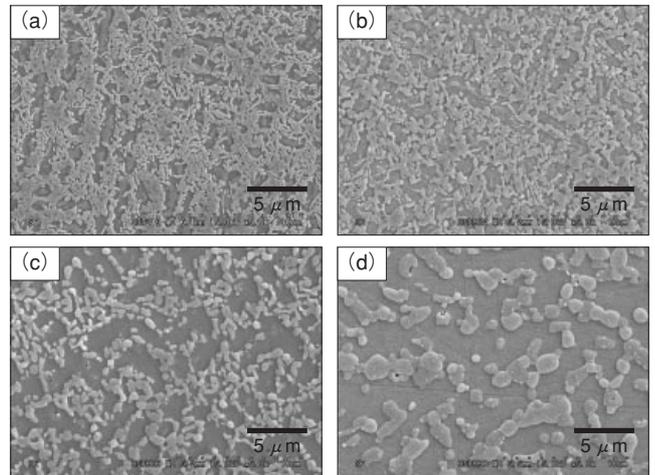


図8 熱処理した  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C球の断面組織  
 (a) 製造まま (b) 600  $^{\circ}\text{C}$  (c) 750  $^{\circ}\text{C}$  (d) 900  $^{\circ}\text{C}$   
 Fig. 8 Cross-sections of  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C droplet (a) as-solidified and heat-treated at (b) 600  $^{\circ}\text{C}$ , (c) 750  $^{\circ}\text{C}$ , and (d) 900  $^{\circ}\text{C}$

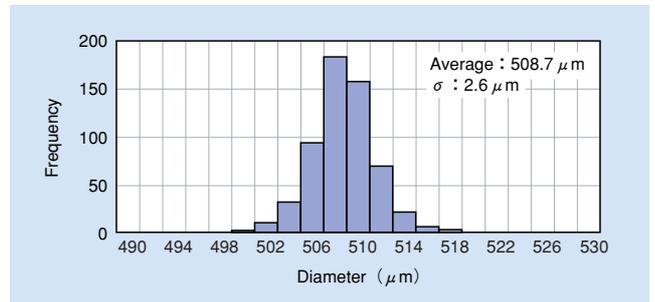


図9  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C球の粒径分布  
 Fig. 9 Distributions of diameter of  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C droplets

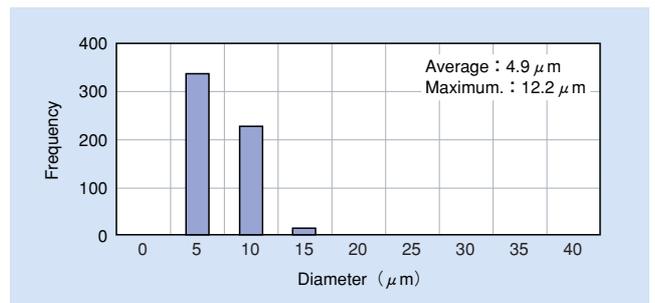


図10  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C球の真円度分布  
 Fig. 10 Distributions of circularity of  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C droplets

ないことと、表2に示したXRDの定性分析において  $\alpha$ -Feが同定されていることから、球の金属相はCをほとんど固溶しない  $\alpha$ -Feとして晶出し、添加したCはほぼFe-B-C炭化物として晶出していると考えられる。よって、Fe-5Si-2.5B-0.6C球(試料 (d))の硬さは、Fe-BおよびFe-B-C化合物の微細分散によるものが支配的であるといえる。また、凝固ままで軸受鋼相当の硬さを有するため、焼入れ-焼戻し等の熱処理工程も省略できる可能性が高い。

図9、図10に  $\phi$  500  $\mu\text{m}$  Fe-5Si-2.5B-0.6C球(試料 (d))の粒径と真円度の分布を示す。平均値  $\phi$  508.7  $\mu\text{m}$ 、標準

偏差 $2.6\ \mu\text{m}$ の単分散を示しており、平均真円度は $4.9\ \mu\text{m}$ 、最大でも $12.2\ \mu\text{m}$ であり、ボールベアリングとして適切な形状に仕上げうると考えられる。以上から、形状、硬さともにFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d））がベアリングボールに必要な条件を満たすと考え、以下の特性評価に供した。

### 3.2 圧碎試験結果

表2に示す作製した球のうち、Fe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d））と、表3に示す比較材2種（SUJ2およびSUS440C）について圧碎試験を実施した。図11に各サンプルを20点採取した破壊荷重データをワイブル確率紙にプロットした結果を示す。プロットは対称ランクを用いて行った。図11から、破壊荷重はFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d）） $<$  SUS440C $<$  SUJ2の順となっており、3種の球の圧碎荷重はいずれも2母数ワイブル分布に従うことがわかる。ここで、各試料の圧碎強度データについて最小2乗法により求めた直線の傾き $a$ （形状母数）が高いほどばらつきが少なく信頼性の高いデータとなる。図11から形状母数 $a$ を求めると、Fe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d））が $a=14.9$ 、比較材のSUJ2が $a=22.3$ 、SUS440Cが $a=21.4$ となり、Fe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d））は比較材よりも破壊強度のばらつきが大きくなった。なお、これらの値は通常の引張試験や曲げ試験で得られる破壊強度の形状母数とは意味が異なるのでそれらとの比較はできないが、 $\phi 3/8$ インチの窒化珪素球の圧碎試験では $a \approx 13$ が得られており<sup>4)</sup>、本結果は妥当な値であると考えられる。

図12に破壊した球の外観、破面を示す。球表面に見られる円形の平面部分が球相互の接触面である。Fe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d））はSUJ2およびSUS440Cに比べて接触面が小さい。このことから、Fe-5Si-2.5B-0.6C

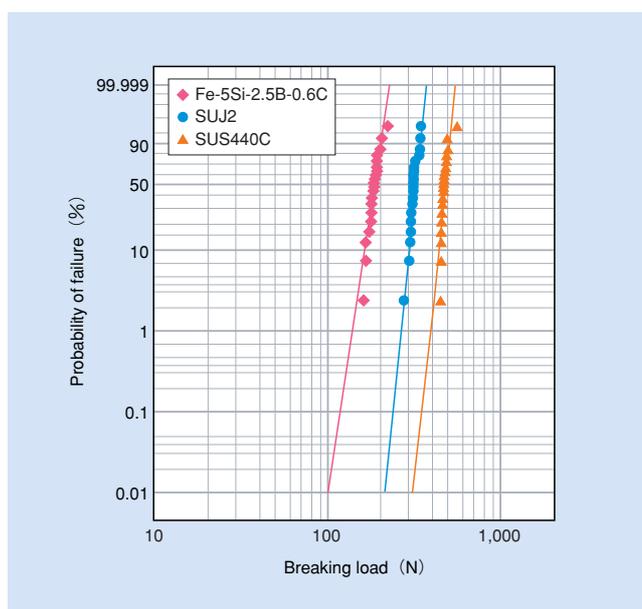


図11 圧縮破壊荷重のワイブル分布  
Fig. 11 Weibull plot of compression fracture strength of  $\phi 500\ \mu\text{m}$  droplets

球（試料（d））はSUJ2およびSUS440Cに比べ塑性変形しにくいと考えられ、そのため、破壊荷重も小さくなったと推定される。

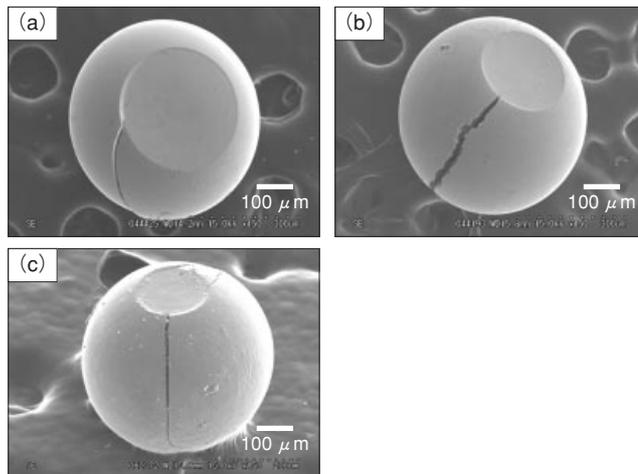


図12 圧縮破壊した球の外観、破面  
(a) SUJ2 (b) SUS440C (c) Fe-5Si-2.5B-0.6C  
Fig. 12 Appearance of fracture surface of (a) SUJ2, (b) SUS440C, and (c) Fe-5Si-2.5B-0.6C by compression test

### 3.3 摩擦試験結果

表2に示す作製した球のうち $\phi 500\ \mu\text{m}$ のFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d））と、表3に示す比較材2種（SUJ2およびSUS440C）についてBall-On-Disc型摩擦試験を行った。図13に摺動距離による摩擦係数の変化を示す。SUJ2、SUS440Cは摺動直後から摩擦係数が増大し、摺動距離が50 mmを過ぎたあたりから摩擦係数は0.8程度で推移したのに対し、 $\phi 500\ \mu\text{m}$ のFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d））は半分以下の0.2~0.4で推移した。乾燥空気中での $\phi 3$  mmのSUJ2球を用いた試験では0.7~0.8の摩擦係数が示されており<sup>5)</sup>、本結果はこれらと比較して妥当であると考えられる。図14に各サンプルにおける比摩耗量と摩擦係数を示す。 $\phi 500\ \mu\text{m}$ のFe-5Si-2.5B-0.6C球（試料（d））は凝固ままの研磨されていない表面であるにもかかわらず、比較材SUJ2およびSUS440Cの半分程度の摩擦係数を示す一方、比摩耗量は1/5程度であった。 $\phi 500\ \mu\text{m}$ の

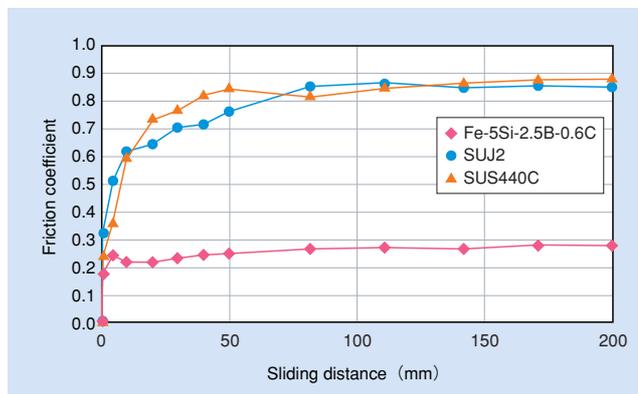


図13 摺動距離による摩擦係数の変化  
Fig. 13 Change of friction coefficient with sliding distance

Fe-5Si-2.5B-0.6C球（試料(d)）は、表2に示したようにFe<sub>2</sub>B化合物が主な構成相の一つである。このFe<sub>2</sub>B化合物は、鋼の耐摩耗用表面処理に用いられる<sup>6)</sup>ことから、相手材と凝着しにくいと推定される。したがって、SUJ2やSUS440Cに比べて摩耗量が低減し、摩擦係数も低下したと考えられる。

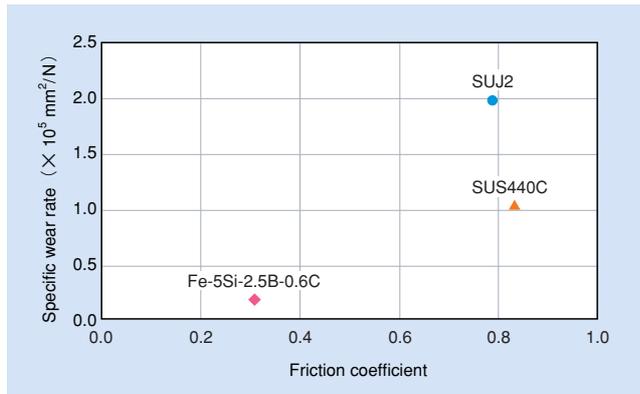


図14 各試験球における摩擦係数と比摩耗量  
Fig. 14 X-Y plot of friction coefficient and specific wear of ball specimen

#### 4. 結 言

UDS法を用いて作製した単分散金属球が、極小ボールベアリング用ボールとして実用可能かを検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) φ500 μm狙いで作製したFe-5Si-2.5B-0.6C球は粒径平均値508.7 μm、標準偏差2.6 μm、平均真円度4.9 μm、硬さHV 829であり、研磨によってベアリングボール用として供しうる特性を得た。
- (2) 球の圧砕試験では、破壊強度値は軸受鋼より小さく、破壊強度値のばらつきは軸受鋼より大きかった。
- (3) 乾燥空気中でのBall-On-Disk型摩擦試験では、摩擦係数、比摩耗量において軸受鋼を上回る特性を示した。

本単分散金属球は、2008年10月現在φ1.1 mmまでスケールアップし、ベアリングメーカーとともに実用に向けての検討を進めている。今後は加工性、転動疲労特性についても評価し、軽荷重・低摩擦に適した微小構造材料としてベアリング用途以外の新たな用途にも備えたい。

#### 引用文献

- 1) P.Yim, J.-H.Chun, T.Ando, and V.K.Sikka: Production and Characterization of Mono-sized Sn-38 wt.%Pb Alloy Balls, Int.Journal of Powder Metallurgy, vol.32 (1996), p155-164.
- 2) 伊達正芳, 佐藤光司, 久保井健: 均一液滴噴霧法により作製したPbフリーはんだボールの評価, 日立金属技報 Vol.18 (2002), p.43-48.
- 3) W.J.Boettinger, L.Bendersky and J.G.Early: An Analysis of the Microstructure of Rapidly Solidified Al-8 Wt Pct Fe Powder, Metal.Trans.A Vol.17A (5) (1986), p.781-790.
- 4) 市川昌弘, 高松徹, 岡部永年, 阿部豊: セラミックス軸受用窒化珪素球の圧砕強度の確立特性, 材料, 40, 457 (1991), p103-108.
- 5) 池山雅美, 中尾節男, 宮川佳子, 宮川草児: PBII法により作製したDLC膜の摩擦・摩耗特性, 21世紀連合シンポジウム論文集 (2002), p.397-400.
- 6) ASM Handbook Vol. 4, Heat Treating, (1991), p437-447.



庄司 辰也  
Tatsuya Shoji  
日立金属株式会社  
特殊鋼カンパニー  
冶金研究所



佐藤 光司  
Kaji Sato  
日立金属株式会社  
特殊鋼カンパニー  
安来工場  
Ph. D



田村 庸  
Yasushi Tamura  
日立金属株式会社  
特殊鋼カンパニー  
安来工場  
技術士 (金属)