

高精度窒化けい素球の加工開発

前田行雄

Development of High Precision Silicon Nitride Balls

Y. MAEDA

The application of ceramic ball bearings using silicon nitride balls has been expanding in the machine tool, chemical, semiconductor and other industries.

Silicon nitride shows superior characteristics compared with conventional high carbon chromium steel. However, the machinability of this ceramic is not good as predicted from its physical properties.

Herein, the cutting and grinding processes and accuracy of developed silicon nitride balls are shown and discussed.

Key Words: ceramic, silicon nitride, ball

1. はじめに

窒化けい素は、高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)に比べ密度が小さく、耐熱性・耐食性に優れており、窒化けい素を転動体に用いたセラミック軸受は工作機械主軸、化学機械、半導体製造装置等に広く使用されている。

窒化けい素は優れた特性を兼ね備えている反面、物理的特性上、加工が著しく困難な材料で、通常は超砥粒(ダイヤモンド砥粒)を使用して加工されている。

ここでは、窒化けい素球の研削加工工程の概要と今回開発した特に高精度が要求されるHDDスピンドル用小径球(呼び2mm)の精度について報告する。

2. 窒化けい素と高炭素クロム軸受鋼の特性比較¹⁾

窒化けい素(Si₃N₄)と高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)の特性比較を表1に示す。

窒化けい素のピッカース硬さは高炭素クロム軸受鋼の2倍であり、そのため、高炭素クロム軸受鋼が一般砥粒(Al₂O₃, SiC)で研削されるのに対し、窒化けい素はダイヤモンド砥粒で研削されている。

表1 窒化けい素と高炭素クロム軸受鋼の特性比較

Characteristics of silicon nitride compared with conventional bearing steel

項目	単位	窒化けい素	高炭素クロム軸受鋼
耐熱性		800	180
密度	g/cm ³	3.2	7.8
線膨張係数	1/	3.2×10 ⁻⁶	12.5×10 ⁻⁶
ピッカース硬さ	HV	1400~1700	700~800
縦弾性係数	GPa	310	210
ポアソン比		0.29	0.30
耐食性		良	不良
磁性		非磁性体	強磁性体
導電性		絶縁体	導電体
素材の結合状態		共有結合	金属結合

3. 窒化けい素球の研削加工結果

転がり軸受用窒化けい素球は、呼び0.8mm~呼び38mmの範囲のものが大多数を占めており、今回報告するHDDスピンドル用軸受の球は呼び2mmである。

以下に、HDDスピンドル用軸受に使用されている呼び2mm窒化けい素球の研削加工結果を示す。

3.1 加工機概要

今回、使用した研削機の概略図を図1に示す。

研削機の主軸は水平で、研削方式は油圧で回転ラップ盤を介してセラミック球に荷重を負荷し研削するものである。セラミック球(以下ワークと称す)は、コンベアが回転することにより回転ラップ盤と固定ラップ盤の間に供給される。

盤間に供給されたワークの一部分は回転中に両盤との間ですべりを生じ、ワーク表面と盤表面との速度差により研削される。

研削されたワークは、コンベア上に排出され、コンベア内を一周し、再度、盤間に供給される。これらのことを繰り返し、ワークは所定の寸法に研削仕上げされる。

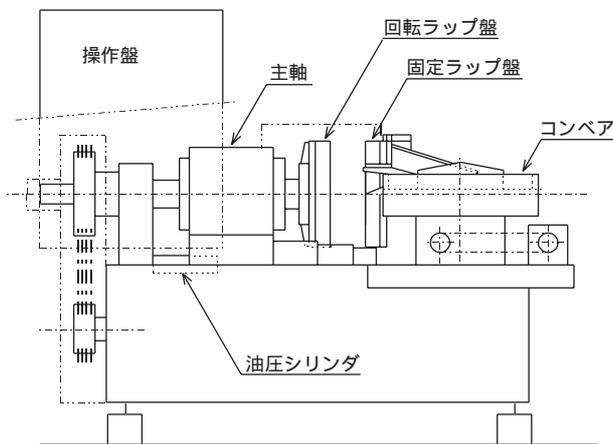


図1 研削機の概略図
Schematic of grinding machine

3.2 研削工程

セラミック球の製造工程では、金型を使用したプレス成形により製造しているため、ワークの外周部には円筒状の余肉が生じる。ワークは脆性材料であり、余肉の角部に大きな荷重が負荷されると欠けが発生するので、円筒状の余肉が無くなるまでは低荷重でまず研削され、その後、数工程、所定の条件で研削される。

研削工程および各工程で使用されるダイヤモンド砥粒の粒径区分を図2に示す。

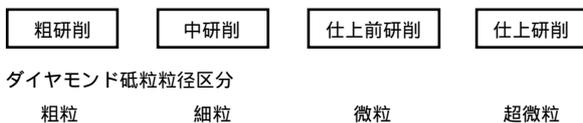


図2 研削工程とダイヤモンド砥粒
Grinding process and diamond grains

3.3 加工結果

3.3.1 表面粗さ

粗研削から仕上げ研削の4工程とも、研削機は図1で示したものを、ダイヤモンド砥粒は図2で示したものを、クーラントは第4類第3石油類を使用した。

各工程で研削されたワークの表面粗さを図3に示す。

仕上げ研削完了ワークの表面粗さは、粗研削完了ワークの1/100以下となっている。

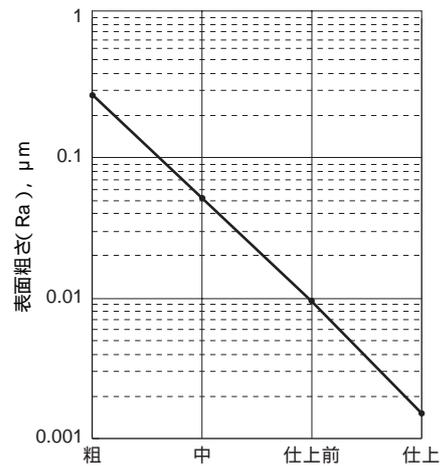


図3 表面粗さと研削工程の関係
Surface roughness at each grinding process

3.3.2 真球度

各工程で研削されたワークの真球度を図4に示す。

仕上げ研削完了ワークの真球度は、粗研削完了ワークの1/100程度になっており、また真球度・表面粗さは、1工程経るごとに前工程精度の1/6 ~ 1/3程度にて向上している。

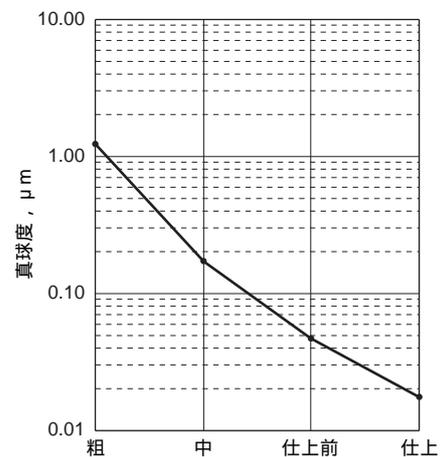


図4 真球度と研削工程の関係
Sphericity at each grinding process

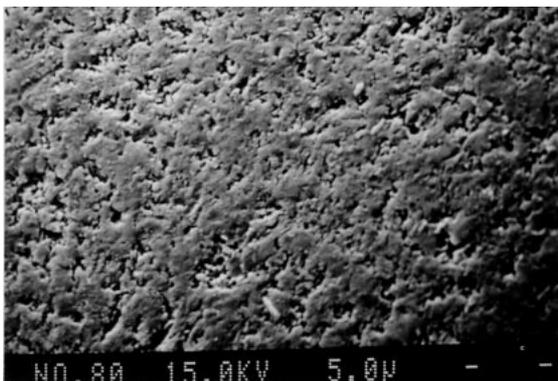
3.3.3 必要な研削量

工程ごとの必要な研削量は、真球度・表面粗さ・直径相互差が所定値になり、前工程の研削条痕を取り除くことが条件で決定される。

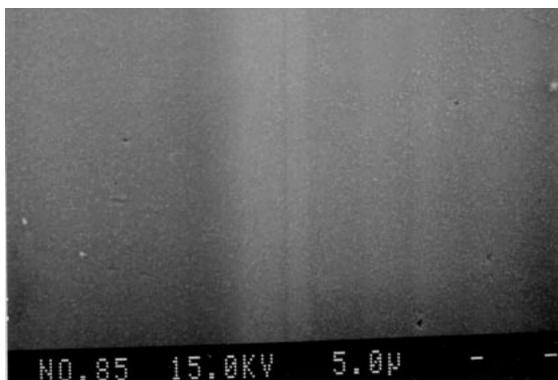
ワークは脆性材料であり、一般的に、切り込み量が多い場合は脆性破壊を起こし脆性モードで除去加工されるが、切り込み量が微小の場合は延性モードで除去加工され、前工程の研削条痕を除去して鏡面が得られると言われている。

図2で示した微粒ダイヤモンド砥粒を使用して加工した仕上前研削完了ワーク、超微粒ダイヤモンド砥粒を使用して微小圧力下で加工した仕上研削完了ワークの2種類のSEM写真を図5に示す。仕上前研削完了ワークは、脆性破壊により発生したクレータが見られるが、仕上研削完了ワークはクレータの無い鏡面となっている。

仕上研削工程では、真球度・表面粗さ・鏡面以外に、軸受の音響値に影響するウェビネス値 (Low Band, High Band) や、NRRO (非同期回転振れ) に影響する直径相互差²⁾が所定値になるまでの研削量が必要となる。



仕上前研削完了ワーク



仕上研削完了ワーク

図5 SEMによる表面写真
Micrograph of ball surfaces by SEM

3.3.4 仕上研削工程完了ワークの精度

仕上研削工程完了ワーク (HDDスピンドル用軸受に組込まれる前のワーク) の特定の断面の真円度は $0.010\mu\text{m}$ 、表面粗さ (Ra) は $0.0015\mu\text{m}$ であった。

表面粗さの測定結果を図6に示す。

1994年頃に、研究室的に直径不同 (1個の球の直径の最大値と最小値の差) が $0.020\mu\text{m}$ 程度、表面粗さ (Ra) が $0.0010\mu\text{m}$ の呼び2mm球が試作されていた³⁾という記録が見られる。

それから6年を経過し、研究室的レベルのものに匹敵する、真円度が $0.010\mu\text{m}$ 表面粗さ (Ra) が $0.0015\mu\text{m}$ の球が量産されている。この球は、医療機器、電気機器、半導体製造装置、工作機械主軸用軸受に使用されている窒化けい素球の中でも最高精度である。

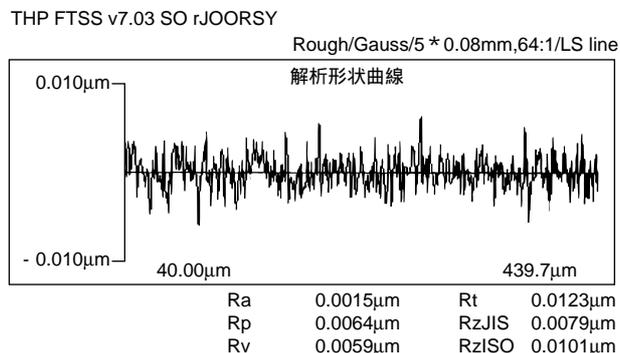


図6 表面粗さ測定結果
Surface roughness data

4. 玉軸受鋼球との精度比較

HDDスピンドル用玉軸受鋼球の1980年、1990年、1999年時点の精度と²⁾3.3.4項で示した窒化けい素球の精度を表2に示す。

1999年の鋼球の真球度・表面粗さは1980年時点の半分程度になっているが窒化けい素球の精度はその鋼球の精度よりさらに優れている。

表2 HDDスピンドル用玉軸受鋼球と窒化けい素球の精度

Accuracy of bearing steel balls and ceramic balls for HDD spindle bearings

区 分	鋼 球			窒化けい素球
	1980年	1990年	1999年	2000年
使用球の呼び	7 / 64"	7 / 64"	2 mm	2 mm
使用球のJIS等級	G10相当品	G 3	G 3 以上	G 3 以上
真球度, μm	0.05	0.04	0.03	0.01
表面粗さ (Ra), μm	0.004	0.004	0.002	0.0015

5. おわりに

窒化けい素球は優れた特性を持つ高硬度の脆性材料であるが、ダイヤモンド砥粒の粒径・加工条件・研削工程数を最適にすることで、鋼球より高精度に研削されることが可能となった。

今後、高精度窒化けい素球は各種用途に使用が拡大していくものと考えられる。

なお、窒化けい素球の低価格化も課題であり、生産技術面の開発をさらに進め、顧客のニーズに対応して行きたい。

参考文献

- 1) 谷本 清, 池田哲雄: KOYO Engineering Journal, no. 156 (1999) 26.
- 2) KOYO 社内資料.
- 3) 後藤賢治: ベアリング, vol. 37, no. 10 (1994) 348.

筆者



前田行雄*
Y. MAEDA

* 軸受事業本部 生産技術センター 生産技術部