粉碎用ジルコニアボールの摩耗特性 — 粉碎機種、内張り材および機械的性質の影響 —

乾 一代*, 大西宏司*, 河波利夫*

The Wear Characteristics of Zirconia Ball in a Grinding Machine — The Effect of the Type of the Mill, Materials of the Tank and Mechanical Properties —

by

Kazuyo INUI[†], Hiroshi OHNISHI[†]
and Toshio KAWANAMI[†]

The wear characteristics of ZrO_2 balls, which were prepared under several conditions, were investigated.

The wear loss of ZrO_2 balls was attributed to the materials of the tank, such as Al_2O_3 , ZrO_2 , and urethane. The wear loss of ZrO_2 balls using a mill with an Al_2O_3 lining was larger than that using a mill with ZrO_2 or urethane. This result indicated that the wear particles of the Al_2O_3 lining worn by ZrO_2 balls attacked the surface of the ZrO_2 balls and promoted the wear of the balls, because Al_2O_3 particles are harder than ZrO_2 balls.

Also, the wear loss of the ZrO_2 balls depended mainly on the grain size, fracture toughness and strength of the balls.

The SEM of the worn surface showed some defects and pores, and the wear mode was primarily intergranular.

It was supposed that phase transformation also had an influence on the wear of the balls.

Key Words : Wear, Zirconia Ball, Wear Particle, Phase Transformation

---

1. 緒 言

電子材料などの材料品質の高性能化、小型化の要請に伴い、その原料は有害不純物の混入しない超微粉体が要求されている。そのため、粉碎処理工程における不純物制御と高効率粉碎が重要視され、耐摩耗性、粉碎性および信頼性のすぐれた粉碎用メディアが要求されるようになった。

そのため、粉碎はボールミル粉碎から、短時間にサブミクロンでシャープな粒度分布の粉体が得られるアトリションミル、サンドミルなどの媒体搅拌型ミルの使用が増加している。このような媒体搅拌型ミルでは、ボールとボールの衝突だけでなく剪断応力などボールミルとは異なった形態の負荷が加わるため、このような条件下でもすぐれた耐摩耗性が必要となってきた。

ボールの摩耗に影響を及ぼす要因としては、大別して粉碎機種、ミル内張り材、被粉碎物、粉碎条件、ボール材質およびサイズなどの使用条件と、密度、硬度、靱性、強度、結晶粒径などのボールの物性の2つが考えられる。これらの要因は、各々が単独に関与するのではなく、両者の相互作用によるものと推測される。そ

平成3年10月24日
(社)日本粉体工業技術協会第3回粉碎分科会(1991年1月,名古屋)にて発表

* (柱) ニッケター研究開発部
〒590大阪府堺市東区小野町3-2-24 TEL 0722-38-3641
Nikkato Co., Technical Division,
3-2-24 Orion Sakai-city 590

のため、使用条件がボールの摩耗特性に及ぼす影響およびボールの物性と摩耗との関係を把握しておく必要がある。

粉碎用ボールは様々な用途に応じてアルミナ、ジルコニア、窒化けい素、炭化けい素、ジルコン、ガラス、スチールなど各種の材質のボールが使用されているが、その中でも $ZrO_2-Y_2O_3$ 系高強度ジルコニア製ボールは耐摩耗性がすぐれているため、媒体搅拌型ミル用ボールとして注目されている。

本稿では、使用条件のうちミル内張り材および粉碎機種がジルコニアボールの摩耗に及ぼす影響について特に検討した。また、ジルコニアボールの物性が摩耗に及ぼす影響を把握し、これらの関係についても検討した。

2. 実験方法

2.1 ボール試料の作成

オキシ塩化ジルコニウム水溶液と塩化イットリウム水溶液から加水分解法にて調整された(東ソー社製)、比表面積 $16m^2/g$ の2.5, 3.0mol% Y_2O_3 含有ジルコニア粉末をスプレードライアにて整粒し、顆粒径 $60\mu m$ の粉体を作成した。この粉体を用いて成形圧50, 100, 200MPaにてCIP成形した後、焼成温度1673, 1723, 1773, 1873Kの4水準で焼成し、直径 $\phi 5$, 10mmのボールをそれぞれ5, 11種類作成した。これらのボールの表面は焼成肌が消滅するまで、パレル研磨にて表面を平滑にした後、実験用ボール試料とした。

2.2 ボール試料の特性評価方法

作成したイットリア強化ジルコニアボールについて、かさ密度、ビッカース硬度、破壊靱性、曲げ強さ、

圧縮強さ、平均結晶粒径を測定した。かさ密度は水置換アルキメデス法により測定した。ビッカース硬度は荷重98Nで測定した。破壊靱性は荷重294NでIM法により測定し、Marshall & Evans¹⁾の式を用いて算出した。 $\phi 10mm$ ボールの曲げ強さは、ボールと同条件で作成した試験片を用いてJIS R 1601による3点曲げ法により測定した数値で代表した。 $\phi 5mm$ ボールはクロスヘッドスピード $0.5mm/min$ で1球式にて圧縮強さを測定した。また、平均結晶粒径はボール断面を研磨しサーマルエッチングした後、走査型電子顕微鏡(SEM)観察を行いインターセプト法²⁾により算出した。試験前後のボール表面の単斜晶量 X_m はボールそのままの表面をX線回折を行い、その強度比からEq. (1)により求めた³⁾。 $I_m(111)$, $I_m(11\bar{1})$ は単斜晶ピーク、 $I_{ct}(111)$ は立方晶+正方晶ピークである。

$$X_m = \frac{I_m(111) + I_m(11\bar{1})}{I_m(111) + I_m(11\bar{1}) + I_{ct}(111)} \times 100(\%) \quad (1)$$

また試験後のボール表面をSEMにより観察した。

2.3 ボール摩耗率の測定方法

Table 1に測定条件を示す。

粉碎機種による影響(Test 1, 2)は作成した5種類の $\phi 5mm$ ジルコニアボールを使用し、ボールミルおよびアトリションミルにおいて検討した。ボールミルにおける摩耗率は、ジルコニア製ボールミルにボール1lと水0.8lを投入し回転数100rpmで48時間空振り試験を行い測定した。またアトリションミルにおいては、内容積0.65lのジルコニア製タンクを用い

Table 1 Experimental conditions for ball mill and attrition mill

Test No.	Grinding Machine	Ball	Condition	Speed	Operating Time
1	Zirconia($Y_2O_3-ZrO_2$) Ball Mill Volume : 2 l	$\phi 5mm$ 3.4kg(1 l)	Water 0.8 l	Mill Speed 100rpm	48h
2	Zirconia($Y_2O_3-ZrO_2$) Attrition Mill Volume : 0.65 l	$\phi 5mm$ 1.36kg(0.4 l)	Water 0.3 l	Agitator Speed 200rpm	36h
3	Alumina(92%) Ball Mill Zirconia($Y_2O_3-ZrO_2$) Ball Mill Urethane Ball Mill	$\phi 10mm$ (Sample No. 6) 3.4kg(1 l)	Water 0.8 l	Mill Speed 100rpm	84h
4	Alumina(92%) Attrition Mill Zirconia($Y_2O_3-ZrO_2$) Attrition Mill	$\phi 5mm$ (Sample No. 2) 1.36kg(0.4 l)	Water 0.3 l	Agitator Speed 400rpm	24h
5	Alumina(92%) Ball Mill Volume : 2 l	$\phi 10mm$ 3.4kg(1 l)	Water 0.8 l	Mill Speed 100rpm	12~84h
6	Urethane Ball Mill Volume : 2 l	$\phi 10mm$ 3.4kg(1 l)	BaTiO ₃ 0.2kg Water 0.8 l	Mill Speed 100rpm	48h

て、ボール 0.4l と水 0.3l を投入し、アーム回転数 200rpm として 36 時間空ずり試験を行い摩耗率を測定した。

ボールの摩耗に及ぼすミル内張り材の影響 (Test 3, 4) は、内張りがアルミナ製 (92% アルミナ)、ジルコニア製 (イットリア強化ジルコニア)、ウレタン製の 3 種類のボールミルと、アルミナ製、ジルコニア製タンクのアトリッションミルを併用した。ボールミルにおいては作成した $\phi 10\text{mm}$ のジルコニアボール (Sample No. 6) を使用して 84 時間、アトリッションミルにおいては、 $\phi 5\text{mm}$ のジルコニアボール (Sample No. 2) を使用しアーム回転数 400rpm として 24 時間空ずり試験をし、ボールの摩耗率を測定した。摩耗率は試験前後のボール重量を測定し、その減少量の試験前のボール重量に対する減量率で示した。

ボールの物性と摩耗との関係は作成した 11 種類の $\phi 10\text{mm}$ ジルコニアボールを使用し、ボールミルにおいて空ずり試験および粉砕試験を行った。ボールミルにおける空ずり摩耗率 (Test 5) は、内容積 2l のアルミナ製 (92% アルミナ) ボールミルにボール 1l と水 0.8l を投入し、回転数 100rpm で 12~84 時間空ずり試験を行い測定した。また粉体の粉砕における各ボールの摩耗率 (Test 6) は内容積 2l のウレタン製ボールミルを用いて、ボール 1l と水 0.8l および BaTiO_3 0.2kg (固形分濃度 20%) を投入し、粉砕時間は 48 時間として測定した。粉砕試験で使用した BaTiO_3 は粉砕工程が重要な電子材料の主な原料であり、産業上粉砕工程にジルコニアボールの使用が一般化しているため被粉砕物として採用した。また、空ずり試験と粉砕試験で使したボールミルが異なるのは、空ずり試験は実際の摩耗の予備試験であり、アルミナ製ボールミルを使用するとジルコニアあるいはウレタン製ボールミルよりもボールの摩耗が大きくなることから、より厳しい条件下で空ずり試験を行うことになり、ボールの物性による摩耗特性の比較を行いやすいと判断し、またウレタン製ボールミルを用いると摩耗量が少なくボー

ルの物性と摩耗との関係を明らかにするには不十分であるため、空ずり試験ではアルミナ製ボールミルを用いた。一方、粉砕試験では被粉砕物とボールの摩耗との関係、すなわち被粉砕物とボールの間に生じるボールの摩耗 (ボールとボールの間に介在する被粉砕物の影響) を把握することが目的であり、ここでアルミナ製ボールミルを用いると摩耗粉混入の恐れがあるとして、被粉砕物によるボールの摩耗を把握するためにはウレタン製ボールミルを用いることが望ましいと考え、また粉砕試験では空ずり試験よりもボールの摩耗量が大きいことから、ウレタン製ボールミルを用いてもボールの物性と摩耗との関係を判断しやすく、実用上 BaTiO_3 を粉砕する場合にも、 Al_2O_3 の混入は好ましくなくアルミナ製ボールミルの使用が少ないためウレタン製ボールミルを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 粉砕機種及び内張り材の影響

Table 2 に作成した 5 種類の $\phi 5\text{mm}$ ジルコニアボールのかさ密度、ビッカース硬度、破壊靱性、圧縮強さおよび平均結晶粒径を、また Table 3 に作成した 11 種類の $\phi 10\text{mm}$ ジルコニアボールのかさ密度、ビッカース硬度、破壊靱性、曲げ強さおよび平均結晶粒径を示す。

ボールミルとアトリッションミルにおける摩耗の相関性を検討するために、Table 2 に示した $\phi 5\text{mm}$ ジルコニアボールの、Test 1 によるボールミルにおける空ずり摩耗率と、Test 2 によるアトリッションミルにおける空ずり摩耗率を Fig. 1 にプロットした。ボールミルにおける摩耗率とアトリッションミルにおける摩耗率とはほぼ直線関係にあり、ボールミルで摩耗率が大きいボールはアトリッションミルにおいても摩耗率が大きくなる傾向を示した。

Fig. 2 に Test 3, 4 による各ミル内張り材におけるジルコニアボールの空ずり摩耗率を示す。ボールミル、アトリッションミルともにアルミナ製内張りよりジルコニア製内張りを使用した時の方がボールの摩

Table 2 Density, vickers hardness, fracture toughness, crushing load and average grain size of zirconia balls ($\phi 5\text{mm}$)

Sample No.	Density ($\times 10^{-3}\text{kg}/\text{m}^3$)	Vickers hardness (GPa)	Fracture toughness ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	Crushing load (kN)	Average grain size (μm)
1	6.01	11.7	5.3	9.4	0.56
2	6.02	12.1	5.4	10.0	0.30
3	6.04	12.1	5.1	9.7	0.27
4	6.01	12.0	5.0	9.0	0.39
5	6.04	11.6	4.8	5.0	0.75

Table 3 Density, vickers hardness, fracture toughness, flexural strength and average grain size of zirconia balls($\phi 10\text{mm}$)

Sample No.	Density ($\times 10^{-3}\text{kg/m}^3$)	Vickers hardness (GPa)	Fracture toughness ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)	Flexural strength (MPa)	Average grain size (μm)
1	5.98	11.5	5.1	759	0.46
2	6.04	11.8	5.1	901	0.47
3	6.08	11.9	5.1	1000	0.45
4	5.80	11.1	5.1	756	0.31
5	6.04	11.6	5.3	863	0.80
6	6.07	12.0	5.1	1117	0.48
7	5.75	9.5	6.3	803	0.35
8	6.00	11.5	6.0	1102	0.52
9	5.87	10.6	5.9	889	0.27
10	5.92	10.2	6.1	972	0.39
11	6.07	12.0	5.6	1167	0.42

Fig. 1 Relation between the wear loss of balls without ground powder using ball mill and attrition mill

Fig. 2 Comparison of the wear loss of zirconia balls without ground powder using ball mill and attrition mill with alumina, zirconia, urethane lining

耗率は少ない。

ボールミルの場合、ボールの摩耗率はジルコニア、ウレタン製内張りでは差が見られなかったが、アルミナ製内張りを使用した時はこれらの内張りを使用した時の約3倍であった。一方、アトリションミルの場合、アルミナ製内張りを使用した時のボールの摩耗率

はジルコニア製内張りを使用した時の約9倍になった。これはジルコニアボールがアルミナ製内張りを摩耗させ、生じたアルミナ製内張りの摩耗粉の硬度がジルコニアボールの硬度より高いため、逆に摩耗粉がボールを摩耗させると推測される。また、内張り材の弾性率がアルミナの場合、ウレタン、ジルコニアに比し高いため、ボールに与える衝撃力が大きくなることも考えられる。また、その影響は高負荷条件になるほど顕著に現れているが、高負荷がかかるとボールが内張りに与える衝撃が大きくなるため、内張りの摩耗を促進させ、更にボールの摩耗を激しく引き起こすものと考えられ、内張り材がボールに与える衝撃力もまたより大きくなると考えられる。

3.2 ボールの物性と摩耗との関係

Table 2に示した $\phi 10\text{mm}$ ジルコニアボールのTest 5によるアルミナボールミルにおける空すり摩耗率の空すり時間依存性をFig. 3に示す。

Fig. 3のように長時間空すりをしても比較的低摩耗で摩耗率の増加が少ない試料、摩耗率の増加が激しい試料およびある時点から急激に摩耗率が增大する試料が得られた。このように各ボールの摩耗特性が異なるのはボールの特性の違いによるものと考えられる。

ボールの物性のうち、密度は緻密性を示す因子であり、硬度は塑性変形に対する抵抗性および粒界の結合力を示す因子である。硬度は被粉碎物との関係においても重要な因子であり、ボールの硬度が被粉碎物の硬度より低い場合、ボールは摩耗損傷を受けやすいと推測される。しかし、ボールの硬度が高すぎても互いに接触する相手部材を摩耗させると考えられる。破壊靱性はクラックの発生および進展に対する抵抗性を示す因子であり、エロージョン摩耗においては硬度、破壊

Fig. 3 Operating time dependence of the wear loss of zirconia balls using ball mill with alumina lining

靱性が高い材料は摩耗量が少ないことが知られている^{4,6)}。強度は破壊の起点となる欠陥の量およびサイズなどが支配的な因子であり、強度が高いボールは欠陥が少ないため摩耗も少なくなると考えられる。結晶粒径は粒子の体積を示す因子であり、粒子離脱摩耗量に関係するものと予測される。これらの物性は互いに相関関係があるように思われるが、ジルコニアにおいて特に相関関係があるとされている結晶粒径、強度および破壊靱性について検討した。一般には、強度は結晶粒径に逆比例することが知られているが、これは欠陥サイズが結晶粒径と近似している粒径の大きい焼結体の場合が一般的である。Fig. 4に本実験に用いたボールの結晶粒径と強度との関係を示す。本実験に用いたボールの結晶粒径は強度に影響するサイズよりかなり小さいため、Fig. 4より結晶粒径と強度に相関性はないものと判断できる。Fig. 5に本実験のボールの結

Fig. 4 Relation between average grain size and flexural strength of zirconia balls (φ10mm)

Fig. 5 Relation between average grain size and fracture toughness of zirconia balls (φ10mm)

晶粒径と破壊靱性の関係を示す。ジルコニアでは結晶粒径が大きい方が破壊靱性は高くなると言われているが、本実験のボールは粒径が1μm以上の破断時に応力誘起相変態量が大きくなる領域よりも小さい結晶粒径であるため、Fig. 5よりそのような関係は成り立たないと判断される。Fig. 6に本実験のボールの破壊靱性と強度とをプロットした。破壊靱性と強度も一般的に比例関係があるとされているが、Fig. 6のように本実験のボールにおいては破壊靱性が増加しても強度は増加していないことから、強度は欠陥サイズが支配的であるものと思われる。他の物性間についても同様に検討したところ相関性は認められなかった。このように各物性間に相関性がないことから、各物性はそれぞれ異なる因子として摩耗に影響を及ぼすものと考えられる。

そのため、これらのボールの物性と摩耗との関係の解析を行うために空ずり摩耗率($W. L.$)と密度(ρ)、ビッカース硬度(H_v)、破壊靱性(K_c)、曲げ強さ(σ)およ

Fig. 6 Relation between fracture toughness and flexural strength of zirconia ball (φ10mm)

び平均結晶粒径($\bar{D}$)との関係をEq. (2)と仮定し重回帰分析を行って評価した。予備実験において、本ジルコニアボールのうち摩耗特性が大きく異なる代表的な5種類のボールについて84時間以降も空ずり試験をしたところ、84時間以降摩耗率と試験時間は比例関係にあったことから、時間に対する摩耗率が同じであれば84時間の時点と違う時刻のデータで解析した場合、ボールの物性が摩耗に及ぼす影響は同じ結果になること、また実験の効率についても考慮し、ここでは、重回帰分析のデータとして84時間空ずり試験した時の空ずり摩耗率を採用した。

$$W. L. = A \cdot \rho^a \cdot H_v^b \cdot K_c^c \cdot \sigma^d \cdot \bar{D}^e \quad (2)$$

その結果、ボールの物性の中で破壊靱性、曲げ強さおよび平均結晶粒径がボールの摩耗に影響を及ぼす因子として有意差が認められ、Eq. (3)が得られた。

$$W. L. = e^{24.2} \cdot K_c^{-2.7} \cdot \sigma^{-2.7} \cdot \bar{D}^{1.4} \quad (3)$$

Eq. (3)による計算値と実測値とをFig. 7にプロットした。

3.2において、ボールミルとアトリッションミルにおける摩耗に相関性があったことから、ボールミルにおいて確認された物性と摩耗との関係は、アトリッションミルにおいても当てはまることが予測できるが、アトリッションミルでは、ボールにかかる負荷やその形態が異なるものと考えられ、また今回の検討では試料としたボールの種類が少なく、重回帰分析による十分な検討まで至らなかったため、今後、詳細な検討を加え、アトリッションミルにおいても各物性と摩耗との関係(重回帰分析における各物性の係数)を明確にしたい。

またTest 6によるBaTiO₃を粉砕した時のボールの摩耗率も同様に実測値より重回帰分析を行った。その

Fig. 7 Relation between the calculated wear loss of balls by the experimental equation (3) and the measured wear loss without ground powder using ball mill with alumina lining

Fig. 8 Relation between the calculated wear loss of balls by the experimental equation (4) and the measured wear loss under grinding BaTiO₃ powder by ball mill with urethane lining

結果、Eq. (4)が得られ、ボールの摩耗に影響を及ぼす因子は空ずりの場合と同様に破壊靱性、曲げ強さおよび平均結晶粒径が得られた。Fig. 8にEq. (4)による計算値と実測値とをプロットした。

$$W. L. = e^{19.6} \cdot K_c^{-2.7} \cdot \sigma^{-1.8} \cdot \bar{D}^{1.3} \quad (4)$$

Fig. 7およびFig. 8はほぼ直線関係にあることよりボールの摩耗率は破壊靱性、曲げ強さに反比例し、平均結晶粒径に正比例していることがわかる。すなわち耐摩耗性にすぐれるジルコニアボールは破壊靱性、曲げ強さが大きく結晶粒径の小さい物性を持っているものと判断される。

Fig. 9に空ずり試験後のφ10mmジルコニアボール(Sample No. 2)表面のSEM写真を示す。

Fig. 9(a)において凹んで白く見える場所が潜在欠陥あるいは摩耗損傷を受けた部分、黒く見える場所がなめらかで光沢のある部分である。Fig. 9(b)の白く見えた損傷部分は結晶粒子が現れており、その部分を拡大したFig. 9(c)はほとんどが粒界破壊であり、個々の粒子あるいは粒子のかたまりが脱落したことが観察された。また、滑らかな部分でもうっすらと粒界が観察されたところがあり、結晶粒の表面摩耗も進行している。粉砕試験後のボール表面も同じような状態であった。Eq. (3), (4)とSEM観察よりボールの摩耗は前者が律速し粒子が脱落しやすいと思われる潜在欠陥などを起点として起こり、そこから損傷部分が広がるものと判断される。すなわち、潜在欠陥が少なく小さいボールは摩耗しにくいものと考えられる。また損傷部分が粒界破壊であることより、クラックが粒界をゆっくりと進展して粒子の脱落に至ったものと推測される⁷⁾。破壊靱性が高い方がクラックの発生および進展は抑制できるため、破壊靱性の高いボールは

Fig. 9 SEM photographs of the worn-surface of zirconia ball(ϕ 10mm sample No. 2)

耐摩耗性にすぐれ、また、結晶粒径が小さい方が粒子の体積が小さいため、粒子離脱摩耗量は少なくなるものと考えられる。

Eq. (3)とEq. (4)を比較すると、破壊靱性の指数は-2.7と等しく、平均結晶粒径の指数は1.4と1.3でほとんど変わらない。しかし曲げ強さの指数は-2.7と-1.8であり、空ずり試験の場合よりBaTiO₃の粉碎試験の方が曲げ強さの寄与が小さくなっている。

Eq. (3), (4)において破壊靱性と結晶粒径の指数に違いが生じなかったのは、空ずり試験後も粉碎試験後もボールの摩耗損傷部分が主として粒界破壊による粒子離脱摩耗であることから、クラックの発生および進展を示す破壊靱性および粒子の体積を示す結晶粒径がどちらの場合においても摩耗に深く関与しているためと推測される。

空ずり試験と粉碎試験では、ボールミルの内張り材は異なるが、アルミナ製ボールミルで空ずり試験した時の摩耗率はウレタン製ボールミルで空ずり試験した時の摩耗率の約3倍であったのに対し、ウレタン製ボールミルでBaTiO₃の粉碎試験をした時の摩耗率は、ウレタン製ボールミルで空ずり試験した時の摩耗率より約6倍大きい値となっていることより、ボールの摩耗は被粉碎物によって支配的におこるものと判断され、内張りによるボールの摩耗に与える依存度は少ないものと考えられる。

以上のことから、空ずり試験では曲げ強さに影響するような大きな欠陥が摩耗に対して支配的であり大きな欠陥の周辺から粒子離脱摩耗が起きていると判断でき、粉碎試験では空ずり試験では摩耗しにくかった曲げ強さには関与しない小さな欠陥の周辺からも摩耗し始めるため、相対的に曲げ強さの指数が小さくなったと推測される。

また、ジルコニアの場合は、衝撃を受けると応力誘

起相変態が起こり、正方晶から単斜晶への相変態は約4%の体積膨張を伴うため、マイクロクラックが発生する。そして更に応力が加わると、このクラックが成長して摩耗に至ると考えられる。試験前後の ϕ 10mmジルコニアボール(Sample No. 1)表面をX線回折した結果、試験前のボール表面には単斜晶が存在せず、試験後には単斜晶が10vol%に増加していたことから、ジルコニアの場合相変態による摩耗への影響も無視できないものと考えられる。

4. 結 論

ジルコニアボールは使用条件およびボールの物性によって摩耗が大きく異なることが明らかになった。

1) ボールミルとアトリションミルにおけるジルコニアボールの摩耗には相関性があった。

2) ジルコニアボールはアルミナ製内張りミルを使用した場合、ボールの摩耗が大きくなるが、ジルコニア製あるいはウレタン製内張りミルを使用した場合にはボールの摩耗は非常に少なかった。これはボールの硬度よりアルミナ製内張りの摩耗粉の硬度が高いため、ボールの摩耗を促進したと判断できる。また、内張り材であるアルミナの弾性率がウレタン、ジルコニアに比し高いためボールに与える衝撃力が大きくなることも考えられる。

3) ボールミルにおけるジルコニアボールの摩耗は強度、破壊靱性が高く、結晶粒径が小さいほど少なかった。このことは潜在欠陥の量や大きさおよび負荷応力によるクラックの発生や進展が摩耗に深く関与しており、摩耗はこれらの欠陥を起点として進行するものと考えられる。

4) ボールミルにおいて空ずり試験した時のボールの摩耗と粉碎試験した時のボールの摩耗は相関性があった。

5) ジルコニアボール表面のSEM観察は大きな損傷部分はほとんど粒界破壊であり、その他の部分は結晶粒の表面摩耗も進行していることを示した。また、ジ

ルコニア特有の応力誘起相変態がボールの摩耗に影響を及ぼすことも推測される。

Nomenclature

$W.L.$	: wear loss of balls	(ppm)	K_{Ic}	: fracture toughness	(MPa $\sqrt{m}$)
A	: constant in Eq.(2)		$\bar{D}$	: average grain size	(μm)
ρ	: density	(kg / m ³)	σ	: flexural strength	(MPa)
H_v	: vickers hardness	(GPa)			

References

- 1) Marshall D. B. and R. G. Evans : *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**, 182(1981)
- 2) Mendelson M. I. : *J. Am Ceram. Soc.*, **52**, 443 (1969)
- 3) Garvie R. C. et al : *J. Am. Ceram. Soc.*, **55** 303 (1972)
- 4) Wada, S. and N. Watanabe : *J. Ceram. Soc., Japan*, **94**, 1157(1986)
- 5) Wada, S. and N. Watanabe : *J. Ceram. Soc., Japan*, **95**, 468(1987)
- 6) Wada, S. and N. Watanabe : *J. Ceram. Soc., Japan*, **95**, 835(1987)
- 7) Lange F. F. : *J. Mater. Sci.*, **17**, 225(1982)