セラミック軸受球の静・動的接触強度特性[†]

高橋 学* 鍛冶川 晋也** 松田 伸也***
黄木 景二* 岡部 永年*

Study on Static and Dynamic Contact Strength of Ceramic Bearing Ball

by

Manabu TAKAHASHI*, Shinya KAJIKAWA**, Shinya MATSUDA***, Keiji OGI* and Nagatoshi OKABE*

In order to investigate the effects of ball diameters and contact loading rates on ring crack occurrence, static and dynamic contact tests were carried out using ceramic bearing ball. As the results, the scatter of ring crack initiation strength in contact test of same ball diameters is smaller than that of same size. Ring crack occurs at a distance from contact boundary with decreasing ratio of ball diameters. Initiation strength of ring crack is not evaluated by maximum tensile stress on the ball surface, because micro-defects of ball surface doesn't consider. Therefore, the evaluation should apply the stress intensity factor. Since the ring crack occurrences are not dependent on size effect, the scatters of strength are constant even if ball diameters change. In the case of dynamic contact tests, the strengths are increased with decreasing loading time. Then, the scatter is also small. Ring crack strength in dependent loading rates can be evaluated using stress intensity factor and cumulative effective hold time.

Key words: Ceramics, Bearing ball, Contact strength, Dynamic contact, Ring crack, Ball size, Contact loading rate

1 緒 言

工業用セラミックスは、自動車用部品^{1)~5)}ガスタービン⁶⁾の高温部品⁶⁾、機械要素部品^{8)~11)}電子部品^{12)~15)}などへの適用研究が盛んに行われ、実製品へ応用展開され実用化されている。機械構造用として、セラミック軸受の実用化の成功と適用拡大は代表的なひとつである。本研究で取り上げるセラミック軸受球は軽量、高剛性、耐焼付き性、耐薬品性等の優れた特性に注目され、各種工作機械、一般産業用機械への実用化が目覚しく、最も高信頼性が要求される航空機に対しても適用化研究が進んでいる。このような社会的な背景のなかでセラミックスのより一層の信頼性および品質の向上が求められている。

セラミック軸受の性能評価としては、静的負荷に対する圧碎強度試験、動的負荷破壊に対する転がり疲労試験が主に行われてきた^{16)~21)}しかしながら、実際の製造工程では、時間のかかる転がり寿命は評価されず、品質確認の圧碎強度が評価されているのが現状である。一方、航空宇宙関連分野において、仕上げ球に対し、インパクト強度試験が実施されている。その試験法²²⁾は、錘を各基準高さから自由落下させて、衝突した際に発生するリングクラック発生の有無で判断している。簡易的であるが、基準高さ設定に関する明確な理論的根拠が不明であるため、危険側の評価を見積もる可能性が高い。本研究では、セラミック球の実用化におけるより一層の信頼性向上を図るために、窒化けい素押し込みの初期段階で

発生するリングクラックを破壊の指標として評価する。

このリングクラック発生メカニズム^{23), 24)}および強度評価^{25)~30)}に関する詳細な報告は、主に球-平板接触での静的条件下で実施されたものであり、球-球接触に対する静的・動的接触試験の報告は圧碎試験に限られている。そこで本研究では、球-球接触に対して破壊力学的観点からリングクラック発生挙動と球径依存性の関係およびその強度特性について系統的に検討した。さらに、定量的な動的接触試験法を考案し、負荷速度の影響について調査し、リングクラック発生強度特性の時間依存性について検討した。

2 実験方法

2.1 供試球

供試球は、Y₂O₃ および Al₂O₃ を主な焼結助剤として常圧焼結した後、HIP 処理を施した、窒化けい素 (Si₃N₄) 球である。球は、ASTM F 2094-03, Class II (grade 5C) 相当に準拠した寸法加工および表面仕上げが施された球径 1/8 ~ 5/8inch (3.18 ~ 15.88mm) を用いた。材料特性を Table 1 に示す。

Table 1 Mechanical properties of Si₃N₄ ball used.

	Density g/cm ³	Bending strength MPa	Young's modulus GPa	Poisson's ratio	Fracture toughness MPa·m ^{1/2}
Ball	3.24	1100	320	0.28	5.1

[†] 原稿受理 平成 20 年 7 月 25 日 Received July 25, 2008 ©2009 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 愛媛大学大学院理工学研究科 〒790-8577 松山市文京町, Graduate School of Sci. & Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

** 愛媛大学大学院理工学研究科 〒790-8577 松山市文京町, Graduate student, Graduate School of Sci. & Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

*** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科 〒790-8577 松山市文京町, Graduate student, Graduate School of Sci. & Eng., Ehime Univ., Bunkyo-cho, Matsuyama, 790-8577

2・2 球—球静的接触試験法

球—球静的接触試験はインストロン製の引張・圧縮試験機を用いて行った。Fig. 1 に試験装置の写真と計測システムの概略図を示す。試験は大気中、室温にてクロスヘッド速度 0.05mm/min で圧縮荷重を負荷した。この際、9/32, 3/8, 5/8inch (7.14, 9.53, 15.88mm) の同一径の場合と 5/8inch に対して押し込み球径 1/8 (3.18mm), 9/32, 3/8inch を変化させた異径の場合の 2 通りの接触試験を行った。リングクラック発生は治具に取り付けた AE センサによって検出された。リングクラック発生荷重は AE センサがき裂発生時の弾性波を検出した際に直ちに圧縮荷重を停止した荷重とした。有効な試験データはリングクラックが一重円となったものだけを採用した。

2・3 球—球動的接触試験法

球—球動的接触試験は Fig. 2 に示すような落錘型試験機を用いて行った。試験機は下部の圧電型ロードセル (富士セラミックス (株) 製 C1K05: 最大使用荷重 5kN) を連結棒に固定し、試験装置台座に挿入後、アクリルフランジをボルトによって固定した。試験球径に合わせたアクリル製ソケットに試験球を 2 個充填し、連結棒上に入力棒とともに装填する。さらに、アクリル製落錘用円筒ガイドで全試験部を覆うように固定した。落錘用円筒ガイド上部から 100g の錘を自由落下させて衝撃荷重を負

荷した。試験に供した球径は 9/32inch である。

実験条件として、固定棒長さ 30mm, 入力棒長さ 50mm を採用した。さらに、アクリルの筒内部に摩擦を低減させるためのテフロンスプレーを吹き付けて実験を行った。リングクラック荷重の同定は、落下試験毎に錘の高さを変化させ、顕微鏡にて上下の球に対してリングクラックの有無の確認することで、ロードセル最大荷重を発生荷重と決定した。ただし、リングクラックは一重円を採用し、半円および多重クラックの場合は測定値から除外した。

3 実験結果および考察

3・1 リングクラック発生荷重と球径依存性

同一径の静的接触試験における球径変化に対するリングクラック発生荷重を 2 母数ワイブル分布にて整理した結果を Fig. 3 に示す。球径が大きくなるとともにリングクラック発生荷重は増大したが、リングクラック発生荷重のばらつきを示すワイブル係数 m はほぼ一定であった。動的接触試験の結果を Fig. 3 中に示す。同一径の静的接触に比べ、リングクラック発生荷重は 47% ほど増大しており、さらに強度のばらつきも小さくなっていることがワイブル係数の差から確認できる。

次に、球径 5/8inch に対して押し込み球径を変化させた異径試験のリングクラック発生荷重を Fig. 4 に示す。

Fig. 1 Quasi-static indentation testing device and measurement system.

Fig. 3 Weibull distributions of ring crack initiation load for same ball diameter under static and dynamic test.

Fig. 2 Weight-drop type dynamic indentation testing device and measurement system.

Fig. 4 Weibull distributions of ring crack initiation load for different diameter under static tests.

押し込み球径の増大とともにリングクラック発生荷重は増大した。一方、 m 値の変化はなかった。Fig. 3, 4 を比較すると、同一径試験のばらつきが異径試験のばらつきに比べて若干大きくなった。この原因として、同一径試験の場合、リングクラックは上下どちらの球にも発生する可能性があるが、異径試験は下部の球径 $D_L = 5/8$ inch (大径) のみリングクラックが発生する。そのため、リングクラックを観察する球数が両試験で異なり、発生荷重のばらつきに差が認められたものと考えられる。

上部の球径 D_U と下部の球径 D_L の球径比 D_U/D_L を変化させ、リングクラック発生位置 x を理論接触円半径 a_{th} で基準化した関係を Fig. 5 に示す。球径比が小さくなるにつれて、リングクラック発生位置が中心から遠方に移動することが明らかとなった。球-平板接触 ($D_U/D_L = 0: D_L = \infty$) において $x/a_{th} = 1.2$ である報告³¹⁾があり、本現象は、球径比に基づく球表面付近の応力場が関与していることが考えられる。動的接触による同一径の x/a_{th} は約 1.03 であり、 a_{th} に近づく傾向がある。

3・2 接触応力分布

リングクラックは接触円外側の球表面層の引張応力により発生する。そこで、2つの物体がともに弾性変形する場合の接触応力をヘルツの弾性接触理論^{32), 33)}を用い、同一径および異径試験について応力分布を求める。ここで、Fig. 6 に示すように接触中心 O から接平面方向を x とし、リングクラック半径 a_r から球中心 O' を通る z^* 方向に座標をとり、応力 σ_x を z^* 方向に対して垂直に座標変換すると、

Fig. 5 Relationship between normalized ring crack radius and diameter ratio of ball.

Fig. 6 Coordinate transformation of stress.

$$\sigma_x^* = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (1)$$

となる。ここで、 θ は接触中心 O を通る z 軸と z^* 軸とのなす角である。リングクラック半径は微小であり、 $\theta \approx 0$ とおくと、 $\sigma_x^* = \sigma_x$ と見なすことができる。

各球径ごとの理論接触円半径 a_{th} で基準化した x/a_{th} 方向の応力分布を Fig. 7 に示す。球表面の引張応力は球径および球径比が小さくなるとともに高い値を示した。また、引張応力は接触境界で最大となり接触境界から離れるとともに減少する傾向が認められる。先の実験結果において、実験値のリングクラック発生位置は理論接触円半径のやや外側で発生しており、算出した球表面の最大引張応力の位置と異なる。よって、リングクラック破壊は球表面の最大引張応力では評価できないことが示唆される。

そこで、各試験においてリングクラック発生位置での深さ方向の応力分布について検討する。同一径および異径の静的接触試験におけるリングクラック発生位置での深さ方向の応力分布を Fig. 8 に示す。両図ともに応力は深さ方向に急峻に引張から圧縮へと変化する応力場を示し、球径増加に伴い応力分布が緩やかになる傾向が見られた。リングクラック発生が球表面層の高い引張応力に起因するとし、その領域内に微小なき裂が存在すると仮定すると、き裂先端では高い引張応力が作用するため破壊に至るための十分な駆動力が存在する。さらに、き裂が成長し圧縮領域に達したとき、き裂進展が停止すると考えると、リングクラックは材料の最終破壊に関与しないことは明らかである。

Fig. 7 Stress distributions σ_x^* to radius direction : (a) same ball diameter and (b) different ball diameter.

Fig. 8 Normalized stress distributions $\sigma_x^*/\sigma_{x^*max}$ toward z^* axis direction : (a) same ball diameter and (b) different ball diameter.

3・3 破壊力学的検討および有効体積の適用限界

リングクラック発生強度特性が如何なる要因に支配されるかを明らかにするために応力拡大係数により検討を行う。前節よりリングクラック発生は球表面に存在する微小き裂に起因すると論じた。そこで、Fig. 6 に示すように、球表面に等価な半円き裂をリングクラック半径 a_r 上に設定し、半円き裂からリングクラックへとき裂が球表面に対して垂直 (z^* 方向) に進展すると仮定すると、半円き裂最深部の応力拡大係数 K_I は、

$$K_I = 2\sigma_{x^*}^{\max} \sqrt{\frac{c}{\pi}} \int_0^c \frac{\sigma_{x^*}(z^*) / \sigma_{x^*}^{\max}}{\sqrt{c^2 - z^{*2}}} dz^* \quad (2)$$

である。ここで、半円き裂長さ c 、球表面から z^* 距離での x^* 方向応力 $\sigma_{x^*}(z^*)$ 、最大応力 $\sigma_{x^*}^{\max}$ である。

同一径において、ある任意のき裂長さ c を仮定し、算出された最大応力拡大係数 $K_{I\max}$ で基準化した応力拡大係数 K_I の分布と球径比の関係を図 9 に示す。 K_I は全ての同一径において、 $x/a_{th} = 1.08$ のときに最大値をとり、Fig. 5 に示した球径比 1 の実験値と一致した。一方、異なる球径における基準化応力拡大係数は、Fig. 10 に示すように球径比が小さくなるにつれて K_I の最大値が接触円境界から外側へ移動することが確認できる。このような挙動も Fig. 5 の D_U/D_L 比が減少するとともに x/a_{th} が增大する実験値とよく一致しており、応力拡大係

数を用いることによりリングクラック発生位置を特定することができる。

同一径および異なる球径における応力拡大係数 K_I とき裂長さ c の関係をそれぞれ Fig. 11 および Fig. 12 に示す。リングクラックは K_I が K_{IC} を超えたとき発生するので、リングクラック発生に關与する初期最小き裂長さ $c_{\min}$ は同一径および異径試験共に球径に依存することなく約 $3\mu\text{m}$ であることが図中矢印より読み取れる。また、初期最大き裂長さ $c_{\max}$ は球径が大きくなるとともに、約 10 から $30\mu\text{m}$ へと増大している。Fig. 8 で示されたように球径が大きくなるとともに、リングクラック発生に關与する応力分布は z^* 方向に拡がり、緩やかな勾配となるため、有効体積は増大する。したがって、き裂寸法も大きくなる傾向にある。一般的にセラミックスは体積が増加すると欠陥量も増加するため、強度にばらつきが発生する。言い換えれば、 m 値が減少する。しかし、本接触条件下において m 値はほとんど変化しなかった。これは、球の極表面層に限られた範囲に潜在している微小欠陥分布特性と応力分布に起因して発生すると考えられ、微小き裂の存在確率が高いため、リングクラックの形成には最小き裂長さが大幅に寄与していると推察される。したがって、球接触によるリングクラック発生強度のばらつきが球径の寸法効果（有効体積）に影響されないことが推察される。以上のように、破壊力学的手法を適用する

Fig. 9 Relation between normalized stress intensity factors and normalized radius distance for same ball diameter.

Fig. 10 Relation between normalized stress intensity factors and normalized radius distance for different ball diameter.

Fig. 11 Relation between stress intensity factor and crack length for same ball diameters.

Fig. 12 Relation between stress intensity factor and crack length for different ball diameters.

と, リングクラック発生に関与するき裂寸法の推定が可能である. その結果, セラミック軸受球の製造および仕上げ加工状態を見積もり, 製品向上への方向性を示唆することができる.

3・4 同径および異径接触試験の優位性の検討

リングクラック発生評価として, 本研究では同径および球径比を変化した異径の二通りの静的接触試験を行った. 両試験のリングクラック発生メカニズムは同じであることから, 両試験方法の優位性について検討した. 球径比を変化させたリングクラック発生荷重は同径に比べて低荷重で発生し, 発生荷重の低下は球径比が減少するにつれてより顕著に表れる. したがって, 試験機の小型化および試験時間の短縮化の両面から球径比を小さくした静的接触試験のほうが同一径の試験よりも優れているといえる. このとき, 球径比を変化させた試験によるリングクラック発生評価は, リングクラック発生位置およびき裂進展方向を考慮する必要がある.

3・5 時間型破壊モデルの検討と負荷速度依存性

セラミックスの破壊現象はその負荷速度によらず, 一定負荷のもとでき裂が徐々に進展するという安定き裂進展現象であり, 広い意味で考えれば全ての破壊は遅れ破壊に属すると言える. つまり, 破壊強度は時間に依存することを意味している. リングクラックの発生もまた欠陥依存型の破壊であるため, 負荷速度を考慮した破壊モデルの検討が必要である.

遅れ破壊によるき裂成長は破壊じん性値以下の領域で起こるため, 安定き裂成長と呼ばれる. これらの安定き裂成長において, 線形破壊力学が適用できる十分に長いき裂があるとき, き裂に働く応力拡大係数とき裂進展速度との間にはパリス則が成り立つ.

$$\frac{da}{dt} = CK_I^n = CY^n \sigma^n a^{n/2} \quad (3)$$

ここで, a はき裂長さの半長 [m], t は時間 [s], K_I は応力拡大係数, n はき裂伝ば指数, C は任意定数, σ は任意応力, Y は形状係数である.

セラミックスは試験形状に比べて初期き裂長さは十分小さく, 不安定破壊するまでに成長しても十分短いので, Y を一定として扱う. 上式を変形すると,

$$a^{-n/2} da = CY^n \sigma^n dt \quad (4)$$

のようになる. ここで, 長さ $2a_i$ の初期き裂が, 不安定破壊する破壊き裂長さ $2a_f$ まで成長するのに要する時間を t_f とし, 試験片は任意の応力変化のもとにあるものとして, 上式の両辺を積分すると,

$$\frac{2}{-(n-2)} \left[a^{-(n-2)/2} \right]_{a_i}^{a_f} = CY^n \int_0^{t_f} \sigma(t)^n dt \quad (5)$$

となる. また, セラミックスの n の値は一般的に非常に大きいので, 上式右辺において a_f の項を省略し, $n-2 \approx n$ とすると,

$$\frac{2}{n} a_i^{-n/2} = CY^n \int_0^{t_f} \sigma(t)^n dt \quad (6)$$

と表される. ここで, 試験片が一定の負荷速度により破壊されるとき, その応力速度を $\dot{\sigma}$ とすると, 任意の時刻における応力は, $\sigma = \dot{\sigma} t$ と表される. よって, 一定負荷

速度試験による破壊強度を σ_f とすると, $\sigma_f = \dot{\sigma} t_f$ と表されるので, これを式 (6) に用いると,

$$\frac{2}{n} a_i^{-n/2} = CY^n \sigma_f^n \frac{1}{n+1} t_f \quad (7)$$

となる. ここで, 不活性環境下における強度 (不活性強度) σ_c を考える. 潜在き裂面に架橋はないとすると, 真の不活性破壊じん性 K_{IC} と不活性強度 σ_c との関係は

$$K_{IC} = Y \sigma_c \sqrt{a_c} \quad (8)$$

のように表される. 言い換えると, 顕著な R 曲線挙動を示す材料に対しては, 式 (8) の関係には適用できない. なぜならば, 不活性環境下においても構造的な安定成長が起こり得るからである. したがって, ここでは, R 曲線挙動による構造的な安定き裂成長を含めて初期き裂長さ a_c と考えるものとする. ここで, 式 (7) の a_i に式 (8) の a_c を代入すると

$$\sigma_c^n = \frac{n}{2} CK_{IC}^n \sigma_f^n \frac{t_f}{n+1} \quad (9)$$

となる. ここで, 不活性強度 σ_c が 2 母数ワイブル分布

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (10)$$

に従うと仮定する. ここで σ_0 は尺度母数, m は形状母数を表す. 式 (10) に式 (9) を代入すると,

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left\{ \left(\frac{n}{2} CK_{IC}^n \sigma_f^n \frac{t_f}{n+1} \right)^{\frac{1}{n}} / \sigma_0 \right\}^m \right] \quad (11)$$

と表される. ここで, σ_0 は不活性強度の尺度母数であるため,

$$K_{IC} = Y \sigma_0 \sqrt{a_0} \quad (12)$$

となる. 式 (11) に式 (12) を代入すると,

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left\{ \left(\frac{n}{2} C \frac{t_f}{n+1} \right)^{\frac{1}{n}} Y \sigma_f \sqrt{a_0} \right\}^m \right] \quad (13)$$

となる. ここで, 表面初期欠陥による応力拡大係数 K_{I0} と有効負荷時間 t_{eff} は次のように表せる.

$$K_{I0} = Y \sigma_f \sqrt{a_0} \quad (14)$$

$$t_{eff} = \frac{t_f}{n+1} \quad (15)$$

ここで, 式 (14) 式 (15) を式 (13) に代入すると

$$F(K, t_{eff}) = 1 - \exp \left[- \left\{ \left(\frac{n}{2} C t_{eff} \right)^{\frac{1}{n}} K_{I0} \right\}^m \right] \quad (16)$$

となる. この式より破壊確率を応力拡大係数と時間の変数で表すことができる.

Fig. 13 に式 (16) より算出した表面初期欠陥による応力拡大係数 K_{I0} と有効負荷時間 t_{eff} の関係を静的接触試験と衝撃接触試験の結果を添えて示す. ここで, 3・3 節で推定した初期き裂長さ $3\mu\text{m}$ よりも粒子最小径が小さいため, 遅れ破壊によるき裂成長は破壊じん性値以下の領域で起こることと矛盾が生じない仮定のもとで, 各得性値 $C = 2 \times 10^{-23}$, $n = 30$, および a_0 には粒子径 $2\mu\text{m}$ を与えて考察した. なお, これらの値は文献値³⁴⁾を参考にし

Fig. 13 Relation of stress intensity factor and cumulative effective hold time.

た。実験値は推定値とよく一致しており、 t_{eff} が短くなるにつれて K_{I0} が増加していることがわかる。これは、負荷速度が速くなるにつれて表面初期欠陥近傍の応力が高くなっていることを表し、衝撃接触試験のリングクラック発生荷重が静的接触試験に比べて高い値を示したこととよく一致する。ただし、岸ら³⁵⁾の報告によれば、本実験負荷速度範囲において Si_3N_4 の破壊じん性値は変化がないことが報告されていることから、 K_{I0} の増大はリングクラック形成に参与する表面初期欠陥寸法がさらに小さくなっていることが推定できる。さらに、このことはその欠陥寸法以下の欠陥存在確率が増大することを意味し、逆にその寸法以上の欠陥はリングクラック形成に参与しないこととなる。言い換えれば、衝撃接触強度のばらつきが静的接触強度のばらつきより小さくなるのは、リングクラック形成に参与する欠陥寸法の大きさが制限された微小欠陥であるためであると説明付けることができる。

以上のことより、負荷速度の異なるリングクラック発生強度は応力拡大係数および有効負荷時間で整理することにより、統一的に評価することができる。

4 結 言

セラミック軸受球による静的および動的接触試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 球径比の異なる接触試験におけるリングクラック発生強度のばらつきは、同一径の場合に比べて小さい。これは球径比が異なる場合、大径側のみにリングクラックが発生するため、破壊確率が低くなると考えられる。また、リングクラック発生位置は球径比が小さくなるとともに、接触境界から離れる。
- (2) 同一球径および異球径の各接触試験条件において、リングクラック発生強度のばらつきは球径に依らず一定であるため、球径の寸法効果（有効体積）に依存しない。
- (3) 動的接触試験において、リングクラック発生強度は、負荷時間が短くなるとともに強度は増大し、そのばらつきは小さくなる。
- (4) 負荷速度の異なるリングクラック発生強度は応力拡大係数および有効負荷時間で整理することにより、統一的に評価することができる。

本研究を遂行するにあたり、科学研究費補助金（基盤研究 (B) 18360406）の援助を受けた。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) S. Ishiwata, "Preliminary Study for Developing Automotive Ceramic Gas Turbine", Journal of the Gas Turbine Society of Japan, Vol.17, pp.34-40 (1989).
- 2) F. Nishiguchi, "Fine Ceramic Applications for Automotive Parts (Fine Ceramics as Precision Machine Material)", Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.54, pp.1236-1239 (1988).
- 3) T. Nishioka, K. Murabe, K. Mastunuma, A. Yamakawa and M. Miyake, "High Strength Si_3N_4 Ceramics and its Application for Automotive Parts", Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol.60, pp.1263-1267 (1994).
- 4) H. Kawamoto, "Application of Reliability Engineering for Safety Design and Maintenance against Mechanical Structure and Components", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.50, pp.550-555 (2001).
- 5) V. P. Tarasovskii and E. S. Lukin, "Prospects of the use of titanium aluminate ceramics in automobile engines", Refractories and Industrial Ceramics, Vol.36, pp.347-350 (1995).
- 6) I. Takehara, T. Tatsumi and Y. Ichikawa, "Research and Development of Ceramic Gas Turbine (CGT 302) (Special Issue "300KW Ceramic Gas Turbine")", Journal of the Gas Turbine Society of Japan, Vol.27, pp.308-316 (1999).
- 7) "Small Ceramic Gas Turbine", Edited by Journal of the Gas Turbine Society of Japan, NTS (2003).
- 8) H. Takebayashi, "Bearing for extreme special environment (4) -Application of ceramic bearings-", Koyo Engineering Journal, No.160E, pp.56-64 (2002).
- 9) H. Ohta and T. Nakagawa, "Using Ceramic Balls to Reduce Noise in a Rolling Guide", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C, Vol.68, pp.957-964 (2002).
- 10) M. Abe, N. Okabe and M. Takahashi, "The Improvement of the Performance and the Reliability of the Ceramic Components for Textile Machinery : Investigation of the Fracture Mechanism of the Ceramic Disk", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.50, pp.284-289 (2001).
- 11) S. Sato, K. Taguchi, R. Adachi and M. Nakatani, "Strength Characteristics of Ceramic (Si_3N_4) Springs", Japan Society of Spring Engineering, Vol.44, pp.55-60 (1997).
- 12) Y. Tsurumi, "Technology in the future of high capacity multilayer ceramics capacitor", Materials integration, Vol.21, pp.59-70 (2008).
- 13) N. Okabe, "Reliability of ceramic joints in electro-devices", Science of Machine, Vol.58, pp.1031-1040 (2006).
- 14) H. Kagata, S. Wada, K. Kato and H. Imai, "The State of Art of Research and Development in Electroceramics", Ceramics Japan, Vol.41, pp.306-309 (2006).

- 15) N. Okabe, "Ceramics jointing in present electric and electronic components and problems in future", The Japan Society of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Congress, 2004 Japan, pp.265-267 (2004).
- 16) M. Ichikawa, N. Okabe and Y. Abe, "Size Dependence of Crushing Strength of Si_3N_4 Balls for Ceramic Bearings", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.40, pp.1348-1354 (1991).
- 17) M. Ichikawa, N. Okabe and Y. Abe, "Consideration of Statistical Treatment of Crushing Test Results of Ceramic Bearing Balls", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.41, pp.1036-1039 (1992).
- 18) Y. Abe, N. Okabe and M. Ichikawa, "Estimation Method for Crushing Strength and Sampling Inspection Method for Si_3N_4 Rolling Bearing Balls", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.42, pp.1090-1095 (1993).
- 19) Y. Mutoh, K. Tanaka and T. Akiyama, "Rolling-Contact Fatigue Properties of Ceramics at an Elevated Temperature : Trial construction of a rolling-contact fatigue test machine and preliminary test results", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C, Vol.54, pp.667-672 (1988).
- 20) K. Kida and K. Ogura, "Fracture Mechanics Approach into the Flaking Subsurface Crack Growth of Si_3N_4 under Spherical Hertzian Rolling Contact", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.66, pp.783-790 (2000).
- 21) M. Ichikawa, T. Takamatsu, N. Matsuo, N. Okabe and Y. Abe, "Rolling Fatigue of Hot Isostatically Pressed Silicon Nitride Bearing Balls with Emphasis on Statistical Properties", Cyclic Fatigue in Ceramics, the Society of Materials Science, Vol.38, No.2, pp.233-244 (1995).
- 22) R. T. Cundill, "Impact resistance of silicon nitride balls", in : K. Niihara, S. Kanzaki, K. Kommeya and K. Morinaga, Editors, Proceedings of the Sixth International Symposium on Ceramic Materials & Components for Engines Japan Fine Ceramics Association, Tokyo, pp.556-561 (1997).
- 23) M. Ichikawa, T. Takamatsu, N. Shindou, N. Okabe and Y. Abe, "Ring Crack Initiation Load of Silicon Nitride Bearing Balls", JSME International Journal, Series A, Vol.38, No.2, pp.226-230 (1995).
- 24) M. Ichikawa, T. Takamatsu, N. Matsuo, N. Okabe and Y. Abe, "Intra-Ball and Inter-Ball Variability of Ring Crack Initiation Load of Silicon Nitride Bearing Balls", JSME International Journal, Series A, Vol.38, No.2, pp.231-235 (1995).
- 25) M. Ichikawa, K. Ohgushi and T. Takamatsu, "Evaluation of Microfracture Strength of Surface Layers of Ceramics Using a Spherical Indenter", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.60, pp.1538-1544 (1994).
- 26) M. Ichikawa and K. Ohgushi, "Influence of Surface Removing on Microfracture Strength of Ceramics as Evaluated Using a Spherical Indenter", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.60, pp.1773-1778 (1994).
- 27) K. Ohgushi and M. Ichikawa, "Fracture Mechanics Study of Ring Crack Initiation in Ceramics by Sphere Indentation", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.61, pp.953-958 (1995).
- 28) K. Ohgushi, K. Homma, M. Ichikawa, N. Okabe, T. Takamatsu, T. Matsumura and Y. Abe, "Strength Degradation in Ceramics by Sphere Indentation : Si_3N_4 Sphere Indentation of Si_3N_4 Specimen-Case of Elastic Condition", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.63, pp.392-398 (1997).
- 29) K. Ohgushi, K. Homma, M. Ichikawa, N. Okabe, T. Takamatsu, T. Matsumura and Y. Abe, "Evaluation of Sphere Indentation Damage and Residual Strength in Ceramics : SiC Sphere Indentation to SiC Specimen-Case of Elastic Condition", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.64, pp.675-680 (1998).
- 30) K. Ohgushi, K. Homma, M. Ichikawa, N. Okabe, T. Takamatsu, T. Matsumura and Y. Abe, "Elastic/Plastic Deformation Analysis in Ceramics due to Sphere Indentation : Si_3N_4 Sphere Indentation to Si_3N_4 Specimen ; Case of Elastic/Plastic Condition", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, Vol.64, pp.681-688 (1998).
- 31) N. Okabe, Y. Abe, M. Ichikawa, T. Takamatsu and N. Kan, "Properties of Strength and Distribution for Ceramics Subjected to Contact Load", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.47, pp.1251-1257 (1998).
- 32) A. Sackfield and D. Hills, "Note on the hertz contact problem : A correlation of standard formulae", Journal of strain analysis for Engineering Design, Vol.18, pp.195-197 (1983).
- 33) G. M. Hamilton, "Explicit equations for the stresses beneath a sliding spherical contact. In : (2nd Edn. ed.)", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 197C, pp.53-59 (1983).
- 34) "CERAMICS STRENGTH DATABASE", Chairman of Editorial Committee H. Nakayama, the Society of Materials Science, Japan, Vol.1, pp.213-215 (1996).
- 35) T. Kishi, N. Takeda, B. N. Kim and K. Suzuki, "Dynamic fracture toughness of ceramics", The Ceramic Society of Japan, Vol.97, pp.1392-1397 (1989).