

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 23 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560096

研究課題名（和文）次世代航空機用セラミック軸受球のインパクト強度信頼性評価技術の確立

研究課題名（英文）Evaluation of impact strength and reliability of ceramic bearing ball for next-generation airplanes

研究代表者

高橋 学 (TAKAHASHI MANABU)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20274334

研究成果の概要（和文）：

衝撃荷重下でのリングクラック強度評価法を確立するための一つとして、振り子式衝撃試験装置および落錘式衝撃試験装置を開発した。振り子式衝撃試験では、球同士の芯調整が難しいため、斜め衝突となる。また、リングクラック発生時の衝突荷重は理論的に算出可能であるが、計測は極めて困難である。一方、落錘式衝撃試験はロードセルを利用することで正確に発生荷重が計測でき、装置製作も比較的容易である。リングクラックは粒子間のガラス相や不純物などのバインダーの破壊が起因となっている。リングクラック発生強度を用いることで微視的な破壊を調査することが可能である。また、衝撃接触では、リングクラック破壊に関与するき裂長さが静的接触に比べ小さくなることで強度が上昇し、ばらつきは減少したと考えられる。

研究成果の概要（英文）：

The equipments of pendulum impact test and weight-drop test were manufactured in order to evaluate the ring crack strength under impact load. In the pendulum impact test, a slanting collision is caused because alignment adjustment of balls center is difficult. The measurement is very difficult although collision load of ring crack initiation is theoretically computable. On the other hand, in weight-drop test, collision load of ring crack initiation is correctly measurable using a load cell. Equipment manufacture is also comparatively easy. The ring crack is attributed to binder destruction of the glassy phase between particles, impurities, etc. It is possible to investigate microscopic fracture from ring crack strength. In the collision contact, the strength of the ceramic ball rises and the scatter of them become small, because the crack length which participates in ring crack initiation is small compared with static contact.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工 学

科研費の分科／細目：機械工学／機械材料・材料力学

キーワード：破壊

1. 研究開始当初の背景

セラミック軸受け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用いられてきた。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。この試験では、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。しかしながら、錘の高さやクラック発生の判断基準は経験に基づいているため、この試験法は簡易だが、理論的根拠が不明で、危険側の評価を見積もる可能性が高い。現在、三種類の試験方法が存在し、それぞれの試験法の互換性および理論的根拠が皆無であり、工業的に統一化されていない状況にある。

研究代表者は、これまでにセラミックス球—平板の静的接触問題に取り組んでおり、応力評価ではなく、破壊力学パラメータである応力拡大係数による評価を提案しており、すでに関連論文を他数公表している。また、動的接触問題として、飛翔体の高速衝突によるセラミックス板の接触破壊挙動も研究しており、本研究はそれらの中間に当たる接触速度領域である。

2. 研究の目的

衝撃荷重下でのリングクラック強度評価法を確立するための一つとして、衝撃エネルギー評価のための振り子式および落錘式試験装置の開発を試みた。衝撃荷重に対するリングクラック発生荷重を測定し、静的接触試験との比較により、その妥当性について検討した。

3. 研究の方法

(1) 振り子式衝撃試験装置の原理と製作

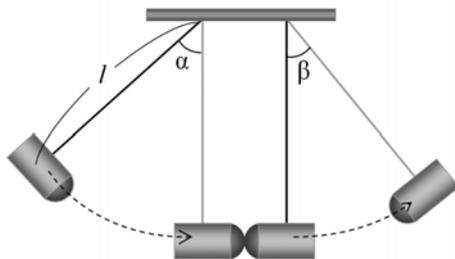


図1 振り子式衝撃試験機の原理

振り子式衝撃試験装置は、図1に示すように一定のアーム長さ l の軽い棒の一端をヒンジで固定し、他端に試験体となる球を固定する。その際セラミック球は軽量であるため、一定の重さのホルダーに球を固定する。この振り子が一對となって設置されている。一方の振り子を角度 α から振込み、他方の振り子に衝突した後、他方の振り子が角度 β まで振

り上がった際の位置エネルギーの差を求める。その差は球—球衝突の際に球表面に発生する損傷使われたものとして定量的な評価が可能となる。その衝突の際の衝突荷重の算出は以下の通りである。

2つの弾性球が衝突した際に発生する衝撃荷重は、H.Schwiegerが提唱した三次元動弾性理論を用いて導いた。2つの弾性球を圧縮荷重 P で押し付けるとき、接触円半径 a の円形領域で接触し、Hertzの弾性接触理論により導かれ式(1)ようになる。次に図2に示す衝突モデルのように、2つの弾性球が相対速度 V_0 で衝突し、衝撃荷重 $P(t)$ を生じる。各弾性球の中心の変位を $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ とし、中心間の接近量を $\delta(t)$ とする。さらに、接触面における P と δ の間にはHertzの弾性接触理論が成立するものとすれば、式(2)の関係が成立する。

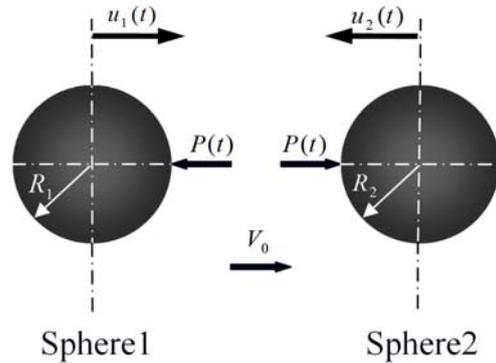


図2 球—球接触モデル

接触圧力：

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2}$$

最大接触圧力：

$$p(r) = \frac{3}{2\pi} P^{1/3} \left[\frac{3}{4} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{-2/3}$$

接触半径：

$$a = P^{1/3} \left[\frac{3}{4} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}$$

中心の接近距離：

$$a = P^{2/3} \left[\frac{9}{16} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right) \right]^{1/3}$$

(1)

基礎方程式： $M_1 \frac{d^2 u_1(t)}{dt^2} = -P(t)$

基礎方程式： $M_2 \frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} = -P(t)$

変位の関係： $\delta = u_1(t) + u_2(t)$

$$\frac{\delta^2 \delta(t)}{dt^2} = -kP(t)$$

$$\left(k = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)$$

初期条件： $\left(\frac{d\delta}{dt} \right)_{t=0} = V_0$

接触の条件： $P(t) = K\delta^{3/2}$

$$K = \left[\frac{16 R_1 R_2}{9 R_1 + R_2} \frac{1}{\left\{ \left((1-\nu_1^2)/E_1 \right) + \left\{ \left((1-\nu_2^2)/E_2 \right) \right\}^2 \right\}} \right]^{1/2}$$

式(2)から P を消去し両辺に dδ/dt を乗ずれば

$$\frac{\delta^2 \delta(t)}{dt^2} = -kK\delta^{3/2}$$

これを変形すると

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = -\frac{2}{5} kK \frac{d\delta^{5/2}}{dt} \quad (3)$$

初期条件を用いて式(3)を積分すれば、次の δ(t) に関する非線形微分方程式を得る。

$$\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 - V_0^2 = -\frac{4}{5} kK \delta^{5/2} \quad (4)$$

dδ/dt=0 で δ は最大値 δ_{max} になるから

$$\delta_{\max} = \left(\frac{5 V_0^2}{4 kK} \right)^{2/5}$$

となる。また、接触時間 t₀ は δ が δ_{max} に達する時間の 2 倍とすれば、式(4)から

$$t_0 = 2 \int_0^{\delta_{\max}} \frac{1}{V_0} \frac{d\delta}{\sqrt{1 - (\delta/\delta_{\max})^{5/2}}}$$

$$= 2.9432 \frac{\delta_{\max}}{V_0}$$

また、衝撃荷重 P(t) の時間的変動は式(4)から

$$t = \int_0^{\delta} \frac{d\delta}{\sqrt{V_0^2 - (4/5)kK\delta^{5/2}}} \quad (5)$$

であるから、δ を与えて式(1)から P を求め、式(5)から t を得ればよい。

近似式として次式が得られる。

$$\delta \cong \delta_{\max} \sin \frac{1.068t}{\delta_{\max}}$$

$$P(t) \cong \frac{1.140V_0^2}{k\delta_{\max}} \sin \frac{1.068V_0 t}{\delta_{\max}} H \left(\frac{\pi\delta_{\max}}{1.068V_0} - t \right)$$

振り子式衝撃試験装置の製作を行った。装置全体の写真を図 3 に示す。窒化けい素球をハンマーに取り付けるためハンマーに直径 14.29 mm の穴を開け、しまりばめを用いて窒化けい素球を固定した。アーム、ハンマー、ベアリングは互いに芋ねじを用いて固定し微調整できるように工夫した。また、振り子の回転部分にはベアリングを用い、摩擦はなるべく小さくなるようにしている。

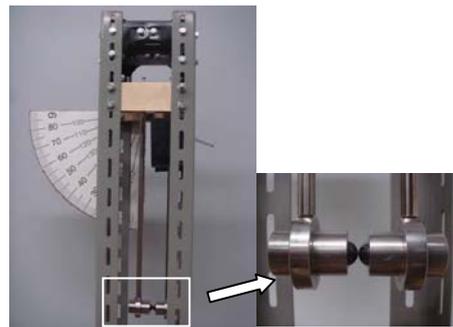


図 3 振り子式衝撃試験機

(2) 落錘式衝撃試験装置

落錘式衝撃試験機の概略図を図 4 に示す。

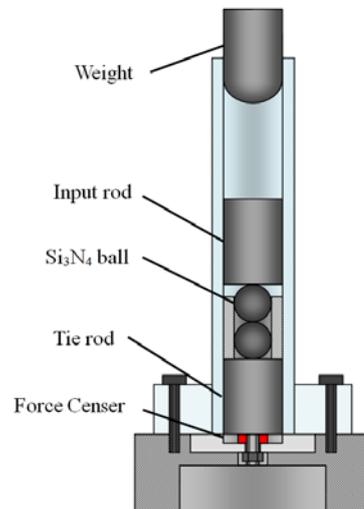


図 4 落錘式衝撃試験機の概略図

2 個のセラミック球を固定し、上部から錘を落下させ、インプットロッドを介して衝撃力を球に伝達する。一方、球の下部には連結棒が圧電ロードセルに固定されており、衝撃力を測定することができる。球の固定は試験球径に合わせた亚克力製ソケットを用意した。図 5 に衝撃接触試験の外観写真を示す。

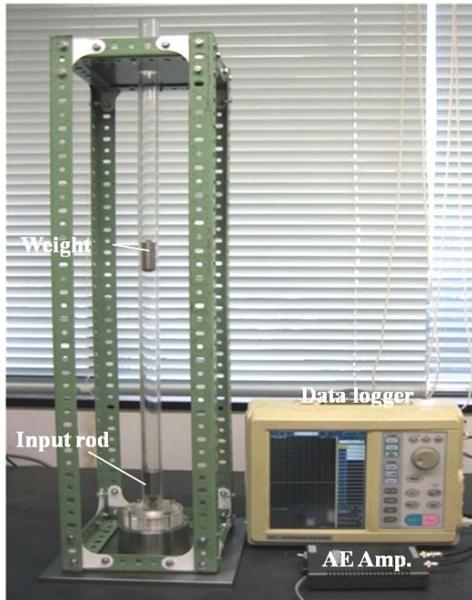


図 5 落錘式衝撃試験機の外観

(2)実験方法

・供試材

HIP 焼結窒化けい素(Si_3N_4)製仕上球を用いた。

表 1 Si_3N_4 製軸受球の機械的特性

Density [g/cm ³]	Bending Strength [MPa]	Young's Modulus [GPa]	Poisson's ratio	Fracture toughness [MPa·m ^{1/2}]
3.24	1100	320	0.28	5.1

試験球直径は個々の試験で説明する。

・振り子式衝撃試験

振り子式球-球衝撃接触試験（以下、振り子試験と呼ぶ。）は 2 つの試験球をハンマー (Hammer-1 および Hammer-2) に取り付け、球を含むハンマー質量 ($M=0.22\text{kg}$) は同一質量とした。2 つのハンマーはアーム長さ $l=380\text{mm}$ に固定し、互いに接触させた状態で静止させた。Hammer-1 を角度 α まで持ち上げて静かに振り下ろし、Hammer-2 に衝突させ衝撃荷重を負荷した。

・落錘式衝撃試験

落錘用円筒ガイド上部から 100, 200, 270[g] の錘を落下させて衝撃荷重を負荷した。リングクラック発生荷重は許容負荷 10, 20[kN] の圧電型ロードセルを用いた。実験条件として固定棒長さは 30mm, 入力棒は 50mm とした。

4. 研究成果

(1) 振り子式衝撃試験

衝撃接触試験において、 $\alpha=74^\circ$ から振り下ろしたときに半円のリングクラックが確認できた。リングクラックは完全な円ではなく半円の形で入っている。また、このときの衝撃荷重 P_{max} はヘルツの弾性接触理論と運動方程式より導いた式より $P_{\text{max}}=8680\text{N}$ となった。ここで、リングクラック強度評価法のひとつとして行われている落水型衝撃試験と静的試験におけるリングクラック発生荷重をプロットしたものを図 6 に示す。これより、衝撃接触試験におけるリングクラック発生荷重は静的接触試験と比較すると高い値を示していることがわかる。しかし、今回行った振り子式衝撃試験においてリングクラック発生荷重は、静的試験では 10480N, 衝撃試験では 8680N と衝撃試験におけるリングクラック発生荷重は静的試験に比べて低い値を示す結果となった。

ここで、リングクラックの発生は接触円外側の球表面層の引張り応力により発生する。今回振り子式衝撃試験では、リングクラックの中心はハンマーの中心よりずれて発生している。よって 2 つの Si_3N_4 球はハンマーの中心よりずれて衝突したことが考えられる (図 7)。ここで衝撃荷重 $P(t)$ は X 軸方向と Y 軸方向に分解することができ、それぞれの方向にかかる衝撃荷重を P_x, P_y とする。X 軸方向に働く力は、接触面から A 側には引張り応力、B 側には圧縮応力として作用し、その結果、A 側の表面層は引張り応力により引張り

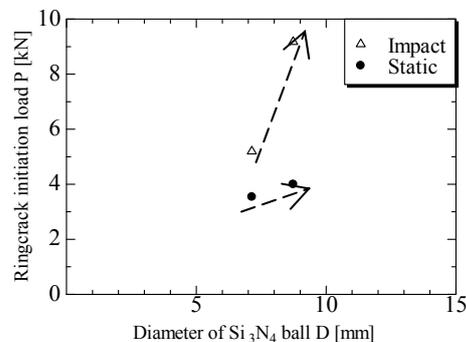


図 6 リングクラック発生荷重

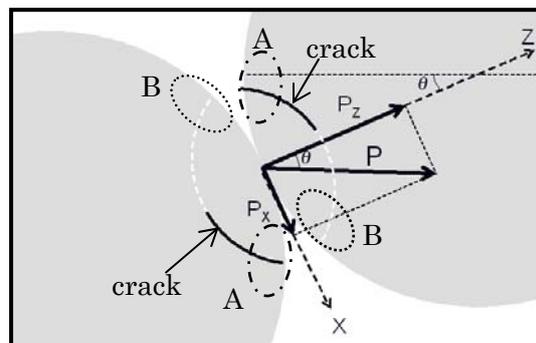


図 7 斜め接触の概略図

応力が増加、また B 側の表面層は圧縮応力により引張り応力が減少する。よって、接触面から A 側の表面における引張り応力が臨界値に達したときにリングクラックが発生したと考えられる。

今回 $\alpha=74^\circ$ から振り下ろしたときについて考えてみる。リングクラックの中心とハンマーの中心のずれは $a=0.45$ であり、これより $\theta=0.9^\circ$ となる。よって、衝撃荷重 $P(t)$ を分解すると $P_X=279\text{N}$, $P_X, P_Y=8676\text{N}$ となる。ここで P_Y は P_{\max} にほぼ等しいと考えると、A 側には衝撃荷重 P_{\max} に加えて余分に 279N の引張り荷重がかかる。この P_X の引張りが作用することによってリングクラック発生荷重は極度に低くなり、A 側のみに半円リングクラックとして発生したと考えられる。

(2) 落錘式衝撃試験

① リングクラック発生荷重

静的接触試験および落錘式衝撃試験におけ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ものを図 8 に示す。球径が増加するとともにリングクラック発生荷重は増加したが、リングクラック発生のばらつきは認められなかった。一般に、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、強度のばらつきは大きくなる。しかし、リングクラック発生荷重は球径増加に伴いばらつきは認められなかった。球径の増加に伴い有効体積は増えるが、その増加は接触円境界外側の円周上であり、微小であるため、ばらつきには影響しなかったと考えられる。衝撃接触試験におけるリングクラック発生荷重は静的試験同様に球径が増大すると共に線形的に増加し、どの球径においても衝撃におけるリングクラック発生荷重は静的なときに比べて約 40~50% 大きくなった。また、発生荷重のばらつきを表す形状母数 m に関しては、静的試験よりも衝撃試験のほうが大きくなっており、負荷速度の増加と共にばらつきが小さくなる傾向を示した。これにより発生荷重に対する負荷速度の影響を明らかにした。

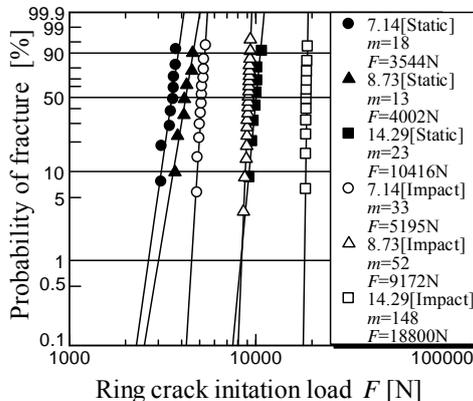


図 8 リングクラック発生荷重のワイブル分布

② き裂進展挙動

球接触におけるリングクラックの発生が最大主応力説に基づくとし、FEM 解析を用いて最大主応力の方向を調査した。球径 8.73mm での球表面層の最大主応力の方向を図 9 に示す。球接触境界付近での表面場の最大主応力は球表面に沿って発生している。 σ_{xx} は球表面から 6~7 μm 内部で圧縮場になり、内部に進展したき裂は球表面から約 45° 傾いた最大主応力方向に傾いて進展し、その後停止したと考えられる。その妥当性を検討するためにリングクラックの断面を観察した。リングクラックは約 7 μm までは球表面に対してほぼ垂直に進展しており、その後斜め約 45° に約 8 μm 進展していることがわかる。これは推定値と同じ傾向にある。このことから、リングクラック発生挙動と応力場との関係を明らかにした。

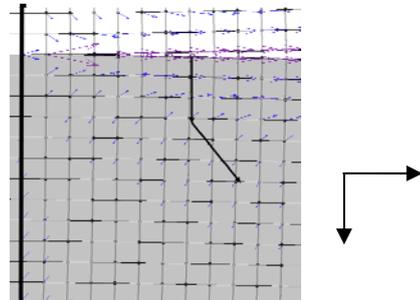


図 9 最大主応力の大きさや方向に対するき裂進展方向

③ 破壊力学的検討

リングクラック発生強度が如何なる要因に支配されてい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った。球表面にき裂長さ c の等価な半円き裂を仮定し、そのき裂が球表面に対して垂直に進展すると、応力拡大係数 K_I は次式で与えられる。

$$K_I = 2\sigma_{r_{\max}}(r, 0) \sqrt{\frac{c}{\pi} \left(A(r)c + \frac{\pi}{2} \right)} \quad (1)$$

ここで、 r は半径方向位置、 z は深さ方向位置、 $\sigma_{r_{\max}}$ は表面場での応力、 $A(r)$ は応力勾配であ

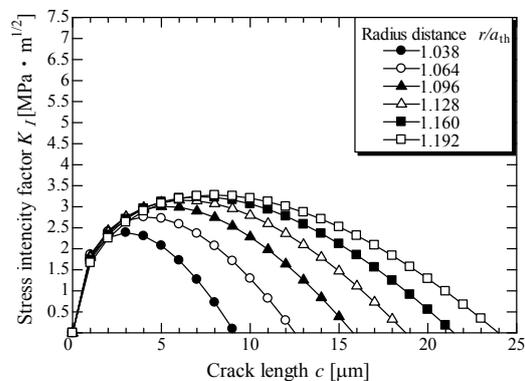


図 10 仮想き裂長さと応力拡大係数の関係

る。図 10 に式(1)を用いて算出された球径 8.73mm での応力拡大係数 K_I とき裂長さとの関係を破壊靱性値 K_{IC} を添えて示す。リングクラックは K_I が K_{IC} を超えたとき発生する。しかし、どの位置においても破壊靱性値に達していない。窒化ケイ素は、それ自身非常に安定な物質であるため、純粋なまま焼結することが困難で、 Y_2O_3 や Al_2O_3 などの焼結助剤を添加して焼結する。よって、これらの助剤酸化物系と窒化ケイ素原料粉体の表面に存在する SiO_2 から構成される $Y_2O_3-Al_2O_3-SiO_2$ ガラスが結晶粒界に存在する。また、本研究で取り扱うリングクラックき裂長さは $15\mu m$ 程度であり、き裂の進展は粒子数個分の破壊である。よって、このようなミクロな破壊を考える場合、粒界に存在するガラス相や不純物などのバインダーに大きく依存していると考えられる。ここで、き裂の安定成長は起こらないと仮定すると、初期き裂長さは球表面での欠陥すなわち表面粗さと近似することができる。そこで、球表面粗さを初期欠陥長さと仮定し、破壊力学的検討を行った。今、表面粗さすなわち初期欠陥長さを $c_c=0.3\mu m$ とすると、算出される破壊靱性値は $K_{IC}=1.08$ である。

図 12 に半径方向位置 r/a_{th} と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 の関係を示す。 K_I は全ての球径において $r/a_{th}=1.05$ で最大値をとり実験値とほぼ等しい値を示した。これらのことから、応力拡大係数を用いることでリングクラック発生位置を特定すると共に、リングクラック破壊のようなミクロな破壊を調査することによって、脆性材料の微視的な破壊靱性値を見積もることができると考えられる。

④リングクラック発生荷重と負荷速度依存性

リングクラック発生に対する評価法として応力拡大係数の適応が有効であることは前節で論じた。そこで、衝撃接触においても応力拡大係数の適応を行った。

窒化ケイ素の破壊靱性値は負荷速度に依存せずほぼ一定であることから、前節で得ら

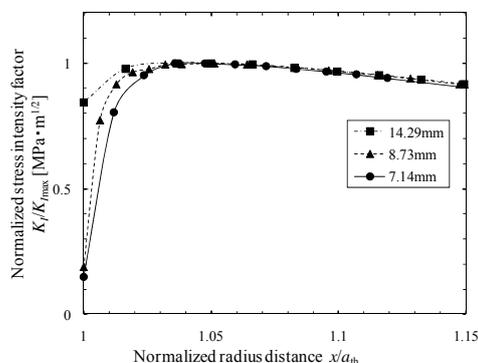


図 11 半径方向位置と算出された基準化応力拡大係数の関係

れた破壊靱性値 $K_{IC}=1.08MPa \cdot m^{1/2}$ を適応させて応力拡大係数の算出を行った。図 12 にき裂長さとの応力拡大係数の関係を示す。これより、衝撃における破壊に関与するき裂長さは $0.12\mu m$ と算出された。これにより、静的接触に比べ破壊に関与するき裂長さが短くなることがわかる。よって、負荷速度の影響に伴いリングクラック破壊に関与するき裂長さが小さくなることが明らかとなった。すなわち、衝撃接触におけるばらつきは減少し、リングクラック発生荷重は増加したと考えられる。これは実験結果と同じ傾向を示しており、解析により証明することができた。

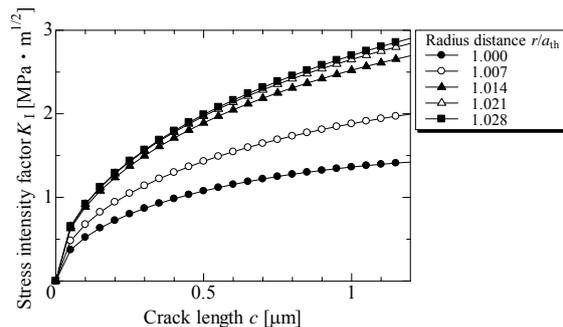


図 12 仮想き裂長さとの応力拡大係数の関係

5. 主な発表論文等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 学 (TAKAHASHI MANABU)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20274334

(2) 連携研究者

黄木 景二 (OGI KEIJI)

愛媛大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70281194

矢代 茂樹 (YASHIRO SHIGEKI)

静岡大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00452681