

セラミックタービン翼の粒子衝突強度向上に関する研究(第一報)

長尾誠^{*1}・松村真史^{*2}・畠山知樹^{*3}・伊藤高根^{*4}

Impact Design Methods for Ceramic Turbine Blades (Part 1)

by

Makoto NAGAO, Masashi MATSUMURA, Tomoki HATAKEYAMA, Takane ITOH

(Received on Sep. 30, 2003 & accepted on Nov. 26, 2003)

Abstract

Aiming at improving the strength of ceramic turbine blades against the impact of foreign objects, several impact tests were carried out, in which a small Si_3N_4 particle was projected onto a Si_3N_4 test specimen at a given speed. Under a laser microscope, the local damage introduced into the specimen was inspected, and residual flexural strength was measured using a 4-point bending test apparatus. Then, the relationship between this damage and residual strength was investigated. Next, these experimental results were compared with the results obtained from similar impact tests with the same specimen materials reported in several past studies. It was found that the residual strength of the specimen impacted at a rather low speed range is markedly low, and that the phenomena of the occurrence of ring cracks are quite different from those shown in such studies. These differences may result from the very slight differences in material property between the spheres used in each impact test. Further investigations on the effects of the relative relationships between the material properties of specimens and spheres on the foreign object damage (FOD) would be necessary, because FOD is the result of the complicated dynamic response of the specimen and sphere.

Keywords: Ceramics, Ceramic Gas Turbine, Impact Damage, Residual Strength, Ring Crack, Finite Element Method

1. 緒言

地球規模の環境問題とエネルギー問題に関連し、分散電源の普及が大いに期待されている。マイクロガスタービンは分散電源を具体化する有力な候補として開発が進められているが、発電効率は30%以下であり、本格的に普及しエネルギー的にも効果を発揮するためには発電効率の一層の向上が必要と思われる。しかし、小型ガスタービンでは翼冷却の採用は困難であり、効率向上に不可欠なTITの上昇にはセラミックスのような耐熱材料の採用が必要であり、セラミックガスタービン(CGT)の研究は世界各国で行われ性能的にはかなりの成果が確認されている。しかし、高速で回転するセラミックタービン翼に粒子が衝突することによりタービン翼の一部が欠け、あるいはそのためにエンジン全体が壊滅的に破損するという報告もなされている。この現象は脆性材料のFOD(Foreign Object Damage)と言われ、ガスタービンと直接関連のない分野においても多くの研究がなされてきているが、具体的な対策案は得られておらず、少しでも効率向上を達成したいCGTでありながら、セラミックスの比強度が高いという特性を活かしきれず、FODを避けるためにタービン周速を下げた設計、運転がなされているのが現状である。

ところで、FODの現象については、Local DamageとStructural Damageの二つの異なるモードが観測されている。前者は衝突点近傍付近にリングクラック、ラジアルクラック等と呼ばれる

亀裂が直接生じるものであり、後者は翼形状の影響が大きく、衝突点から離れた場所に亀裂が生じる。例えば、翼先端に粒子が衝突すると衝突点とは離れたところに曲げ応力が発生し、応力が過大な場合はそこに亀裂が生じる。従って、FODに強い翼を設計するには、材料特性及び形状の両面から対策する必要がある。

そこで、FODに強い高効率CGTの実現に対して効果のある具体的対策方法を提案することを最終目的として、先ず、Local Damageに注目し、新たに粒子衝突実験を実地し、従来言われている現象との比較を含め検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試験片及び試験球

試験片には日本特殊陶業株式会社製のガス圧焼結窒化珪素(EC-141)50mm×8mm×t3mm、衝突面の表面粗さは $Ra=0.2$ 、試験球には品川白煉瓦株式会社製のサイアロンセラミックス球(SAN-P)φ1.0mmを用いた。

2.2 実験装置及び実験手順

Fig.1にガス銃式試験装置の模式図を示す。ABS製樹脂サボットに試験球を取り付け、ヘリウムガスによりサボットをランチャーに沿って押し出す。サボットはサボットストッパーで停止し、試験球のみ試験片側に飛び出す仕組みとなっている。試験球の速度は、ストッパーと試験片保持器に取り付けた加速度センサーにより衝突時の瞬間の波形を記録し、それより飛翔時間

* 1 工学研究科機械工学専攻博士課程前期
* 2 工学研究科機械工学専攻博士課程前期
* 3 中村自工
* 4 工学部機械工学科教授

を測定し速度を求める。速度はヘリウムガスの圧力を調整することにより自由に変える事が出来る。

粒子衝突実験における試験片の支持は試験片両面をそれぞれ2本の平行ピンにて挟むように支持されるが、それぞれのピンの距離を変えることにより、衝突面に任意の引張、圧縮応力がかけられるように工夫されている。

残留強度の測定にはJIS R 1601 ファインセラミックスの曲げ試験方法に基づきクロスヘッド速度0.5mm/min、内スパン10mm、外スパン30mmで4点曲げ試験を行い評価する。衝突面及び残留強度測定後の破断面の観察にはレーザー顕微鏡を使用した。

3. 実験結果及び考察

試験片に粒子を衝突させ、その損傷状況、残留強度を調べる方法は多くの研究者によって行われ、それらのほとんどは粒子衝突速度をパラメータとして整理しているが、研究者により粒子の材質、大きさ等が異なり、個々の研究結果を考察する上では便利であるが、他者の結果と比較するには、速度が同じということとは全く意味をもたない。そこで試験片の材質が同じで、試験球の材質及び大きさが比較的近い実験例として大串等¹⁾の実験結果(文献(1))と比較しながら本実験結果の整理、考察を行う。また、試験片及び試験球の材質、大きさ等の影響を考慮したパラメータとして次式で示す最大負荷加重 P_{max} ¹⁾を導入した。

$$P_{max} = \left(\frac{2000 \pi^3}{243 Y^2 \rho_2^3} \right)^{1/5} R^2 v^{6/5} \quad (1)$$

$$Y = \frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \quad (2)$$

これは試験片と衝突球がともに弾性体であり衝突時に接触を保っている間は静的に釣り合うとし、運動方程式および Hertz 理論より求めることができる。 v_1 と v_2 は試験片と試験球のポアソン比、 E_1 と E_2 は試験片と試験球のヤング率、 ρ_2 は試験球の密度、 R は試験球の半径、 v は試験球の速度である。

比較に使用した文献(1)の試験片は 48mm×10mm×t3.6mm、衝突面の表面は鏡面仕上げを施している。試験球には HIP 焼結窒化珪素 ϕ 1.0mm, 1.6mm, 4.0mm を使用している。また、衝突面の背面にバックプレートを使用して実験を行っている。

3.1 表面損傷

試験球をある速度で試験片に衝突させた後、まず衝突地点を

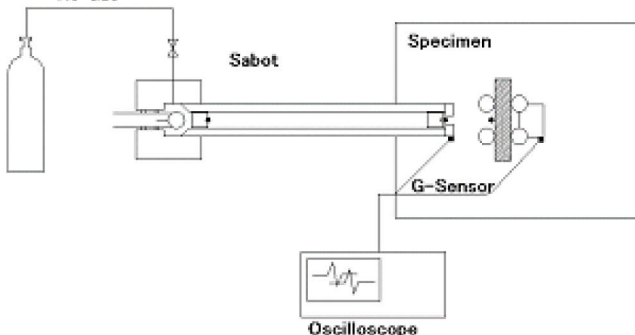


Fig.1. Impact test apparatus

中心にレーザー顕微鏡にて表面損傷状況を観察した。Fig.2, Fig.3, Fig.4 に代表的な表面状況を示す。速度と表面損傷の関係を簡単にまとめると試験球速度 167m/s 未満ですでに圧痕が確認でき、167m/s 以上ではリングクラック(Fig.2)が、227m/s 以上で剥離損傷、368m/s 以上でラジアルクラック(Fig.3)が確認され、473m/s 以上では上述のリングクラックの内側に小さなリング

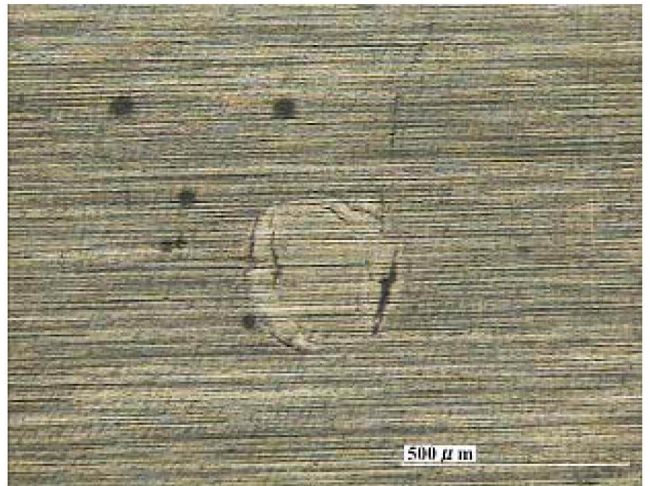


Fig.2. $v=167\text{m/s}$

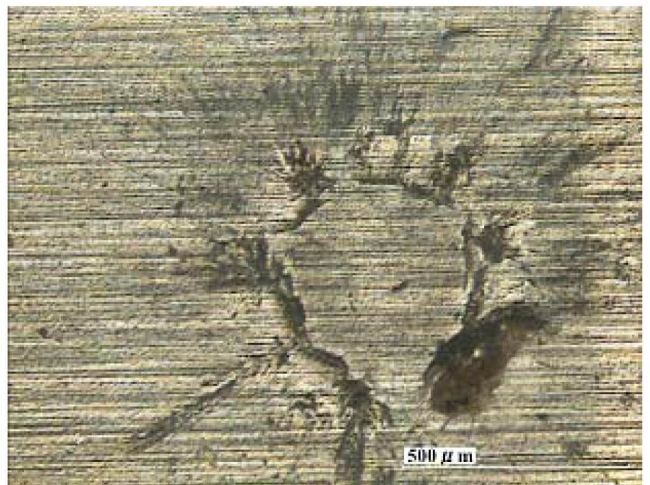


Fig.3. $v=368\text{m/s}$



Fig.4. $v=517\text{m/s}$

クラック(Fig.4)が確認された。また、ほとんどの試験球は粉碎されていたが、衝突速度が 135m/s~175m/s 以内の速度域ならば 2~5 個以上に破壊された状態で回収できた試験球もある。

これらの観察結果をもとに、リングクラック最外側(RC_{Out})及び最内側(RC_{In})のおよその半径を P_{max} に対して整理し、文献(1)の試験球直径 φ 1.0mm の実験結果と比較したものを Table 3, Fig.5 に示す。Fig.5 の実線は、本実験条件に対して Hertz 理論よりもめた接触円半径であり、次式で求められる。

$$a_H = \left(\frac{5}{4} \pi Y \rho_2 \right)^{\frac{1}{5}} R v^{\frac{2}{5}} \quad (3)$$

Table 3 に示すようにリングクラック、ラジアルクラックの発生する P_{max} がかなり違う結果となっている。Fig.5 より、P_{max} が 4000N 付近までは RC_{Out} の半径は文献(1)の値とほぼ同じ大きさであるが、このような P_{max} が小さい範囲でも文献(1)では RC_{In}

が発生しており、その半径の値がほぼ 100 μm で一定なのに対して、本実験ではこのよう速度域では RC_{In} は観察されず、両者には大きな違いがある。また、P_{max} が 4000N 以上の実験は文献(1)ではなされていないが、本実験では 60 μm 程度の RC_{In} が P_{max} = 4888N (v = 473m/s) 以上で発生することが観察され、RC_{Out} のばらつきも大きくなっている。

3.2 残留強度

粒子衝突実験後、衝突面を下向きにして 4 点曲げ試験を行い残留強度を測定した。Fig.6 に P_{max} に対する残留強度の関係を示す。比較のために文献(1)の主な実験結果(試験片の厚さ 3.6mm、試験球 φ 1.0mm, 1.6mm, 4.0mm) を加えてある。この両者の試験片はまったく同じ材質であり、粒子もほぼ同じような材質となっている文献(1)では外スパン 36mm、内スパン 12mm で 4 点曲げ試験を行っている。)

まず本実験(○)と文献(1)の試験球直径 φ 1.0mm の実験結果(□)を比較してみると、P_{max} が 2000N 以上ではほとんど違いはないが、1500N 付近の残留強度は、本実験の値は文献(1)と比べ半分以下となっている。この領域の表面の損傷状態は Fig.5 でみられるように RC_{Out} の大きさはほとんど同じであった。ただし既に述べたように、文献(1)では RC_{In} が出現しているのに対して、本実験では全く観察されなかったという違いがある。これが残留強度の違いと関係あるかどうかは不明である。Fig.6 の(■)及び(×)は、それぞれ試験球直径が φ 1.6mm と φ 4.0mm の場合の文献(1)の残留強度であるが、φ 1.0mm と φ 1.6mm は P_{max} が同じならばほぼ同じ残留強度となっているが、φ 4.0mm の場合は残留強度が大きくなっている。これは、塑性変形への影響なども異なり、単純な押し込み荷重 P_{max} のみでは整理しきれない事を示している。

Table 1. Properties of specimen and sphere

Mechanical Properties	This experiment	
	Specimen	Sphere
Density (kg/m ³)	3230	3230
Young's Modulus (GPa)	320	315
Poisson's Ratio	0.27	0.29
Vickers Hardness	1500	1700
Fracture Toughness (MPam ^{1/2})	6.0	6.0

Table 2. Properties of specimen and sphere

Mechanical Properties	Reference (1)	
	Specimen	Sphere
Density (kg/m ³)	3230	3240
Young's Modulus (GPa)	320	304
Poisson's Ratio	0.27	0.28
Vickers Hardness	1500	1476
Fracture Toughness (MPam ^{1/2})	6.0	7.6

Table 3. Summary of the experiment compared with the reference (1)

	Test Results	Reference (1)
Destruction of the Sphere	P _{max} = 1086N (v = 135m/s) でも圧砕した。	P _{max} = 2255N (v = 250m/s) 以上で発生した。
Ring Crack (In)	v とともに増加 a _H より少し大きく、P _{max} = 4888N (v = 473m/s) 以上ではばらつきが大きい。	v とともに増加 a _H より少し大きい。
Ring Crack (Out)	P _{max} = 4888N (v = 473m/s) で初めて観測され、v によらずほぼ一定(60 μm 程度)。	低い v でも発生し、v によらずほぼ一定(100 μm 程度)。
Radial Crack	P _{max} = 3617N (v = 368m/s) 以上で発生した。	P _{max} = 2255 N (v = 250m/s) 以上で発生した。
Tipping	P _{max} = 2026N (v = 227m/s) 以上で発生した。	高速衝突で発生した。

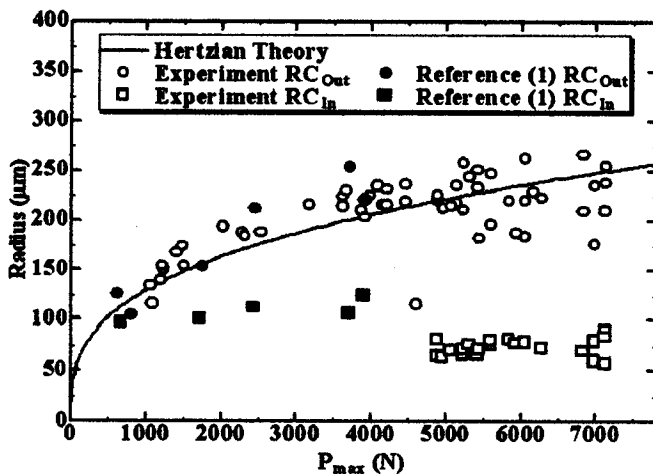


Fig.5. Ring crack radii

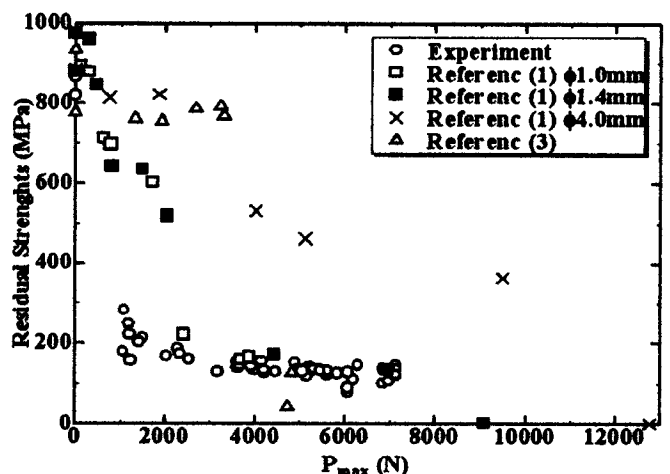


Fig.6. Residual strengths

3.3 破断面

比較的低速度域において、本実験の残留強度が文献(1)と比較して大きく低下している原因をさぐるため、4点曲げ試験後の破断面の観察を行った。Fig.7に $v=150\text{m/s}$ ($P_{\text{max}}=1232\text{N}$)における破断面の3D高低画像を示す。衝突面に垂直にメディアクラックのようなものが見える。この速度域に対する破壊は文献(1)には示されていないため直接の比較は出来ないが、この近傍の速度における破壊起因はダメージゾーンであり、 250m/s ($P_{\text{max}}=2255\text{N}$)近くでの破壊起因はラジアルクラック/メディアクラックと述べられていることと比較すると、本実験における 150m/s 近傍の破壊の原因は明らかに違うように思われる。なお、Fig.8に $v=267\text{m/s}$ ($P_{\text{max}}=2461\text{N}$)、Fig.9に $v=648\text{m/s}$ ($P_{\text{max}}=7132\text{N}$)の破断面を示すが、この P_{max} に相対する文献(1)の破断面の写真と比べると破断面はよく似た状況を示しており、残留強度がほぼ同じ場合には似たような破断面形態となることが確認できる。

3.4 考察

以上のように本実験と文献(1)の実験結果には、特に低速域で大きな違いが見られた。これらの違いの原因をさぐるため、実験条件の違いを改めて整理してみる。

(1)試験片の厚さ: 本実験では 3.0mm であるのに対し文献(1)では 3.6mm であるが、大串等は、厚さ 3.6mm 、 9.0mm の試験片についてそれぞれの残留強度の低下傾向を調べ、残留強度に板厚依存性は見られなかったと報告しており、この程度の厚さの差は原因ではないと思われる。

(2)衝突面粗さ: 本実験では $Ra=0.2$ であり、文献(1)の衝突面はラッピング及びポリシングにより $20\mu\text{m}$ 以上除去して鏡面仕上げを施したものを使用している。市川等²⁾は表面層を除去した効果を小球押し込み実験と比較し、表面層を除去すると微小破壊強度、曲げ強度が低下しその原因は圧縮残留応力層が除去される為であると報告している。従って、衝突面の状態による違いは単純に比較すれば本実験の残留強度の方が低くなる理由とはならないと思われる。詳細は省くが、本実験において衝突面に圧縮応力を付加した場合の実験結果によれば、試験片の残留強度は、粒子衝突速度 150m/s 付近では向上している事を考慮すると、衝突面の状態の影響は直接の原因とは考えられない。

(3)試験片保持方法: 文献(1)では、試験片の背面にバックプレートを使用し、曲げが起こらないように固定しているのに対し、本実験では試験片両面を平行ピンで挟むように支持しており、試験球の衝突により試験片が曲がる恐れがある。しかしながら、この場合の衝突面は凹面となるためむしろ圧縮応力が作用し前項の考察で述べたように、残留強度は高くなる可能性の方が高く、これも原因とは考えられない。

(4)試験球の材質: 本実験ではサイアロンセラミックス、文献(1)ではHIP焼結窒化珪素を用いている。基本的には両者とも窒化珪素であるが、Table 1, Table 2に示すように本実験の試験球の方が硬度は高く、破壊靱性値はいくらか小さく、他の値も多少異なっている。なお、秋宗³⁾は、試験球に直径 $\phi 1.0\text{mm}$ のジルコニア球を用い、試験片の材質を変えて粒子衝突実験を実施し、試験片の硬度、ヤング率、破壊靱性値の影響について検討している。それらの中にガス圧焼結窒化珪素の残留強度の例が示されている。物性値の記載が無いため詳細は不明であるが、本実験で用いた試験片と同じメーカーのほぼ同じ材質と推定され、試

験球は品川白煉瓦株式会社製のジルコニア(SZY-H)の物性値で代用した。その実験結果によれば、残留強度が顕著に低下する臨界速度は 280m/s ($P_{\text{max}}=3483\text{N}$)で、それ以下の速度では強度低下はわずかであり、破壊の原因はヘルツクラックと報告されている。Fig.6の文献(3)のプロット(Δ)と比較して見ると、本実験、文献(1)の結果ともまた異なる。FODの現象は試験片と試験球との反発現象であるから、試験片と試験球との相対的な関係が影響することは明らかであり、結果が異なるのはある程度は予想される。

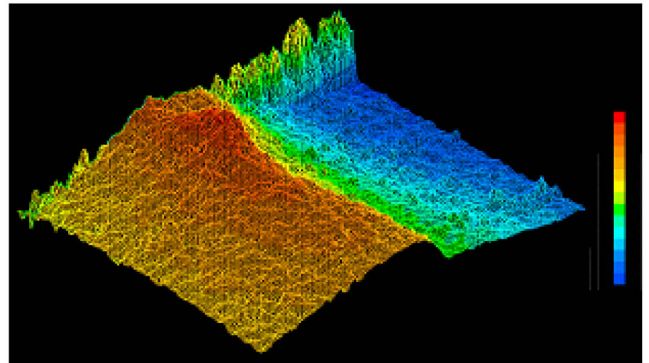


Fig.7. $v=150\text{m/s}$, $P_{\text{max}}=1232\text{N}$

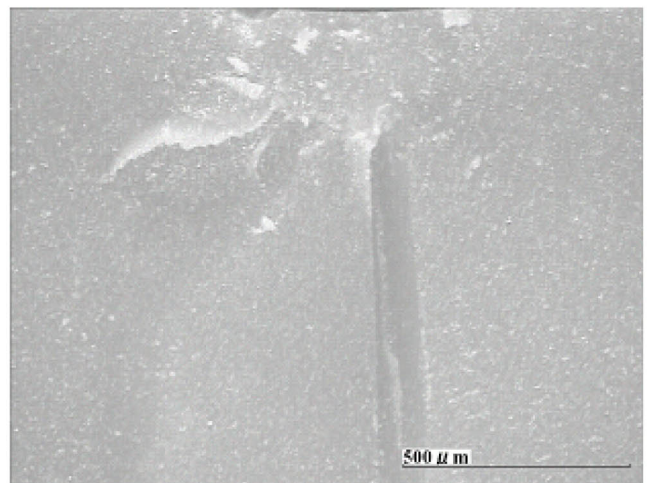


Fig.8. $v=267\text{m/s}$, $P_{\text{max}}=2461\text{N}$

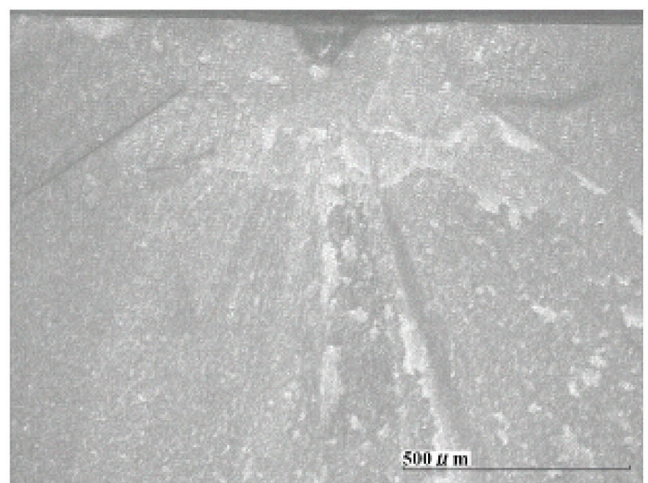


Fig.9. $v=648\text{m/s}$, $P_{\text{max}}=7132\text{N}$

4 数値解析

始めに、低速時において本実験結果が文献(1)の結果と比べて残留強度が低い原因を探るために、LS-DYNAを使用したFEM解析を行った。解析精度の検討をするために衝突方向の応力をHertz理論⁹⁾と比較してみる。Fig.10の(a)に解析モデルの全体図を(b)に衝突部分の拡大図を示す。試験片モデルの最小要素長さは $2.0\mu\text{m}$ 、試験球モデルは $1.0\mu\text{m}$ である。また、対称性を考

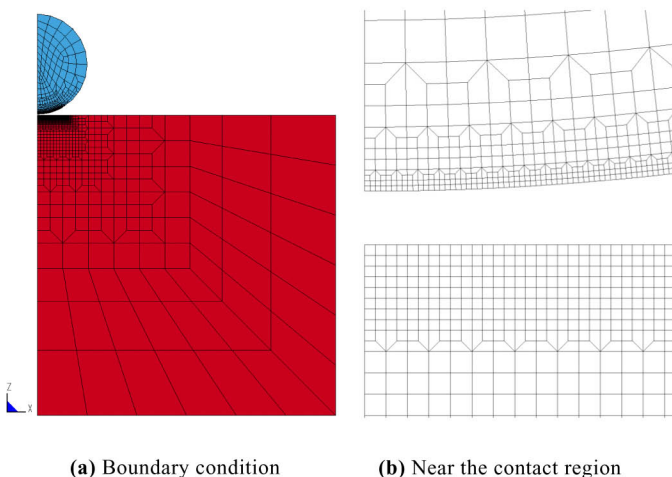


Fig.10. Finite element model of contact between sphere and plate

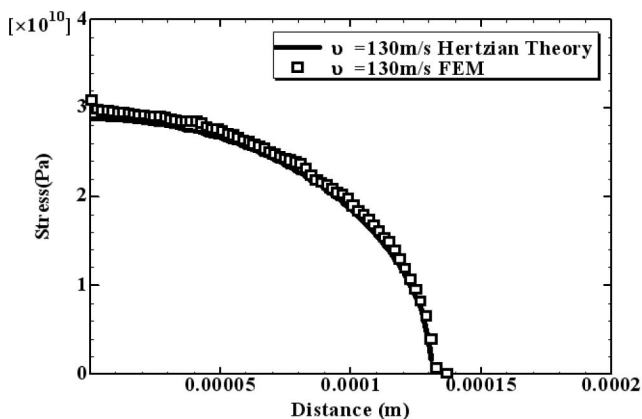


Fig.11. Comparison with FEM and the Hertzian theory

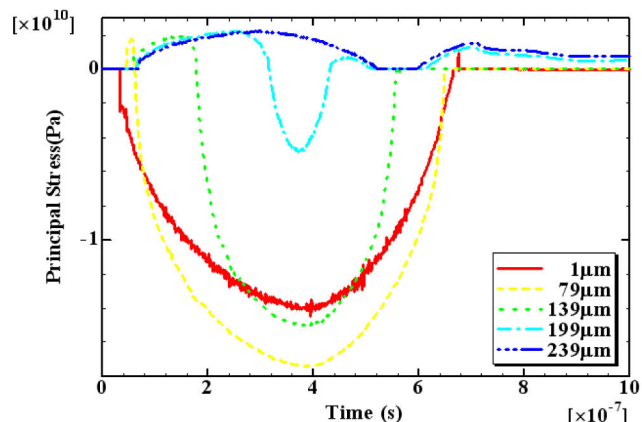


Fig.12. The distribution of the principal stress on the surface

慮して試験片寸法は $3.0\text{mm}\times 3.0\text{mm}$ とし接触中心を原点にとり円筒座標系で $\theta=5$ 度の3次元モデルを作成した。同様に試験球は $\phi 1.0\text{mm}$ となるようにした。Table 1に示す物性値を用いて衝突速度 $v=130\text{m/s}$ での弾性解析の結果、同速度におけるHertz理論との結果をFig.11に示す。衝突点中心から接触円境界まで比較的良い一致を示していることが確認できた。

次に、下記の二点について調べた。

- (1) 密度、ヤング率、ポアソン比の影響: 先ず本実験の条件に相当する物性値を用いて $v=130\text{m/s}$ ($P_{\text{max}}=1085\text{N}$)の解析、文献(1)の物性値を用いて P_{max} が同じ条件になるように衝突速度を考慮し $v=136\text{m/s}$ ($P_{\text{max}}=1086\text{N}$)の解析を行い比較した。衝突点表面と衝突点直下の主応力の値を比べたところ、応力分布、応力値とも大きな差がない結果となった。このことから密度、ヤング率、ポアソン比の差はほとんど影響がないと考えられる。むしろ今回入力していない硬度や破壊靱性値の影響の方が強いと思われ、今後これらの値を考慮した解析を行っていく必要があるといえる。
- (2) 試験片支持方法による影響: 前述したように、本実験と文献(1)の実験では試験片支持方法が平行ピンによる4点支持とバックプレートによる支持という違いがあることから、それぞれの支持方法を再現し、粒子衝突速度 $v=150\text{m/s}$ での弾性解析を行った。その結果、4点支持モデルの衝突表面中心から深さ方向の応力分布は、バックプレートによる支持モデルに比べ、僅かであるが高い圧縮応力が働き、また衝突面背面に関しては遥かに高い引張応力が生じた。これからも3.4(3)の考察で述べたように支持方法の違いは原因とはならない。

次に本実験の物性値を用いて破壊を考慮しない弾塑性解析を行った。Fig.12に粒子衝突速度 $v=300\text{m/s}$ の時の衝突点から1, 79, 139, 199, 219 μm の距離にある試験片表面の要素の最大主応力を示す。縦軸に最大主応力、横軸に時間を取り、縦軸の正の値を引張応力、負の値を圧縮応力とする。この図より試験球が接触する部分では圧縮応力が働き、そのすぐ外側の部分では引張応力が生じ時間とともに接触部分が拡大していく様子がわかる。これはFig.13の衝突部分縦断面内の主応力分布からもわかる。接触円境界外側で生じていた引張応力も試験球が押し込まれ接触円が広がっていくことで圧縮応力に変わる。また、引張

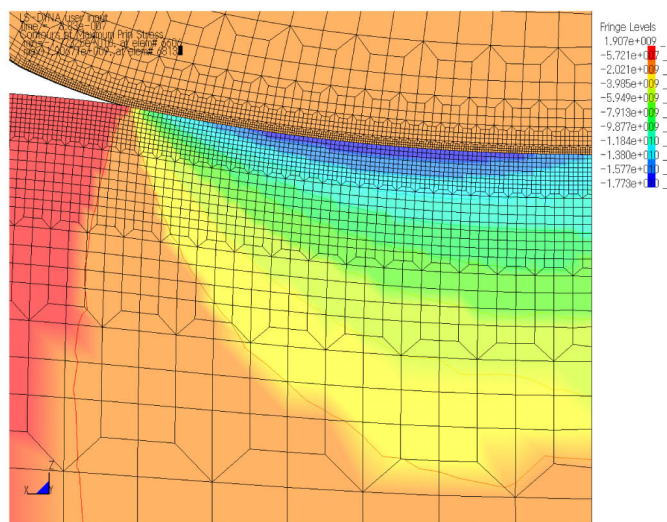


Fig.13. The distribution of the principal stress in the vertical section

応力のみが生じている部分があるが、これは最大接触円境界の外側にある部分である。次に最大接触円が発生する時の接触円境界付近の最大主応力を Fig.14 に示す。この図から最大接触半径は、圧縮応力が生じている $201\mu\text{m}$ と引張応力が生じている $205\mu\text{m}$ の間に存在することが確認できる。従来ならば、押し込み過程で試験片の最大引張応力を超えた引張応力が生じている部分で亀裂が発生し、引張応力が順次解放されることでリングクラックが同心円状に発生すると言われている。また、実験より粒子速度 300m/s の時に RC_{out} の半径は $188\sim 216\mu\text{m}$ であり、他に複数のリングクラックが RC_{out} の内側に発生することが確認されている。しかし、今回の解析では破断が考慮されていないため、リングクラックの発生箇所を特定することは困難である。しかし、 RC_{out} は最大接触半径の外側に発生すると従来言われていることから、引張応力の生じている $205\sim 213\mu\text{m}$ の近辺で発生すると推測される。本解析結果によって推測される RC_{out} の半径は妥当な値であると言える。

5 結論

窒化珪素製の試験片に直径 $\phi 1.0\text{mm}$ の窒化珪素製の試験球を衝突させ、衝突速度による表面損傷状況を観察し、4点曲げ試験による残留強度を調べ、またその時の破断面を観察し、同様な実験を実施している他の研究者の実験結果とも比較しながら検討を行った。その結果、次のようなことが判った。

同じ試験片を用いた他者の実験結果と比較したところ、低速における残留強度が著しく低い結果となった。その原因は現状では明らかではないが、この種の実験結果が微妙な試験条件の差で表れる可能性もある(同一速度における実験点はほとんどの場合1点であり、極めて少ない。)

衝突面に発生する、外側のリングクラック径などはそれ程大きな差は見られなく Hertz の理論半径とも良い一致を示した。しかし、衝突により試験球が試験片にめり込む深さに応じて少しずつ半径の大きなリングクラックが次々と同心円状に発生すると従来言われているが、このようなリングクラックの形成は同じような速度域では見られなかった。逆に、高速度域において、小さなリングクラック状のものが外側のリングクラックの内側に発生した。

試験片材質が同じ材料であっても、衝突粒子の物性値の差が大きく影響している可能性がある。また、試験球の破損の状況も異なるようである。これら物性値の違いを考慮に入れた最大

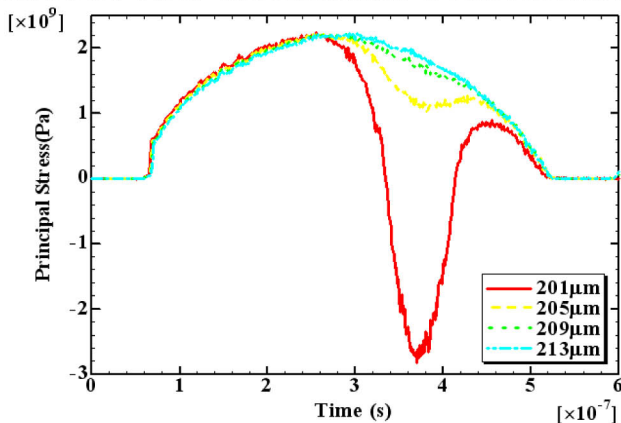


Fig.14. The distribution of the principal stress on the surface

押し込み荷重 P_{max} の概念は、塑性変形への影響も異なるため、これだけではうまく整理はできないようである。

他者の実験においても、試験後の試験球の破壊状況は粉碎されてしまうためほとんど調べられていない。FODは試験片と試験球との反発挙動で起こるものであるから、相対的な関係をさらに調べる必要がある。

参考文献

- 1) 大串浩、本間恭二、市川昌弘、岡部永年、松村隆、阿部豊、小球衝突によるセラミックスの表面損傷と残留強度の変化(第1報、窒化けい素平板への窒化けい素球衝突-実験結果)、機論、65-634、A(1999)、1263-1268
- 2) 市川昌弘、大串浩司、球圧押し込みによるセラミックスの微小破壊強度の評価に及ぼす表面層除去の影響、機論、60-576、A(1994)、1773-1778
- 3) 秋宗淑雄、セラミックスにおける粒子衝撃損傷、セラミックス、25[2](1999)、134-137
- 4) 中原一郎、渋谷寿一、土田栄一郎、笹野英秋、辻知章、井上裕嗣、弾性学ハンドブック、(2001)、P471-P473、朝倉書店