

氏 名	Shin 申	Hyung 亨	Seop 燮
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学位授与年月日	平成 3 年 10 月 9 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学第二専攻		
学 位 論 文 題 目	粒子の衝突によるセラミックスの損傷		
指 導 教 官	東北大学教授 前川 一郎		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 前川 一郎	東北大学教授 小林 陵二	
	東北大学教授 高橋 秀明	東北大学教授 阿部 博之	
	東北大学教授 加藤 康司		

論 文 内 容 要 旨

構造用セラミックスは優れた高温高強度特性をもつため、省エネルギー・高効率の達成という観点から熱機関材料としての利用への期待が高まって、すでにガスタービンでの利用が始まろうとしている。しかし、セラミックスは脆性材料であり、靱性が低いという欠点もある。このため、局部的損傷が直ちに全体の破壊に結びつく恐れも高い。したがって、セラミックスを高速回転するガスタービン翼などの部品として用いる場合、強度に関する重要な課題の一つは飛来する微小粒子の衝突に対する損傷抵抗の確保である。しかし、粒子の衝突時にはいろいろな因子が影響するので、その損傷挙動の完全な把握にはまだ多くの問題が残されている。

そこで本論文では、ガスタービン材として期待されている炭化珪素 (SiC) セラミックスに小さな球形粒子が衝突するとき生じる損傷特性とその損傷による部材の強度低下挙動を明らかにし、タービン翼などの部材の安全設計に生かしていくことを主な目的としている。その中で次のような因子に注目して系統的検討を行う。

- (1) 先ず、粒子の静的に押込んだ場合と衝突させた場合に負荷形式や衝突粒子などの相違がもたらす損傷挙動への影響。
- (2) 一般的な場合として粒子が斜めに衝撃する場合、接触条件とそれによる接触部の応力状態の変化がもたらす影響。
- (3) 実使用条件を考慮し、高温下での材料の性質変化及び表面での酸化物層の存在が及ぼす粒子衝

撃損傷への影響。

(4) 粒子の繰返し多数回衝撃による損傷の累積効果。

このため本論文は以下の各章から構成する。

第1章は緒論であり、本研究の背景、必要性、目的などについて述べている。

第2章では、粒子の衝撃によってセラミックスに生じる損傷に及ぼす負荷形式と粒子の種類及び粒子径などの影響を明らかにするために、SiCと鋼粒子の静的押込みと衝撃実験を行った。それぞれの接触状態において、負荷に伴う表面損傷の増大をヘルツの接触理論に基づいて考察した。また内部損傷がもたらす試験片の強度の低下について考察を行った。その結果、粒子の静的押込みの場合や鋼粒子を衝撃させた場合には接触部にリングき裂だけが生じた。しかし、SiC粒子の高速衝撃を受けた場合は試験片の衝突部に生じたクレーターの底部が元の表面レベルより下の方へ永久変形をしており、その変形に伴ってラジアルき裂などの2次的き裂が発生した。また、試験片表面でのリングき裂の発生時の臨界荷重あるいは臨界速度に及ぼす粒子径の影響は破壊理論とヘルツの接触理論に基づいて考察できた。発生したリングき裂は押込み荷重あるいは衝撃速度が増すにつれてその数と外径が大きくなっていったが、その変化は負荷形式に関係なく類似した傾向を示した。なお、同一負荷に対しては鋼粒子の方がSiC粒子の場合よりも大きなリングき裂を生じた。これは高速になると鋼粒子自体が変形し試験片との接触部を押し広げたことによるものと考えられる。一方、粒子の衝撃によって試験片の内部にも損傷が生じ、その後の残留強度は静的押込みの場合と違って粒子の材質によって異なる挙動を示した。そして残留強度は粒子の衝撃速度が増すと図1のように変化した。これはSiC粒子の高速衝撃の場合、衝撃点に生じた塑性変形に起因するラジアルき裂の発生が、強度の低下に影響を及ぼしたからである。また、試験片の内部に生じるコーンき裂の開き角度は粒子の衝撃速度が増すにつれて減少した。

第3章では、粒子の衝撃角度を変えて粒子が試験片表面に対して斜めに衝撃するとき、衝撃力の接線成分が損傷挙動に及ぼす影響を検討した。また、表面及び内部に生じる損傷の解析には、静的すべり摩擦の場合と同様なモデルを用いて考察した。

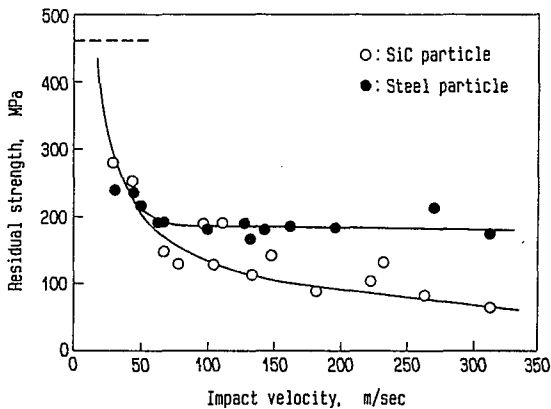


図1 粒子衝撃後の残留強度と衝撃速度との関係

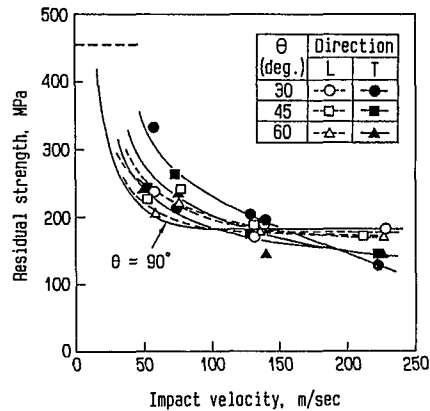


図2 鋼粒子の斜め衝撃後の残留強度と衝撃速度との関係

その結果、表面には粒子の衝撃速度が低いときは静的すべり摩擦の場合と類似した部分的リングき裂が生じたが、衝撃速度が大きくなると、それが閉じた形となって、衝撃方向にその中心がずれた非同心円状の多数のリングき裂が発生した。しかし、リングき裂の最外側直径の増大には衝撃速度の垂直成分が大きな役割を果たしていることがわかった。また斜め衝撃は内部に生じる損傷の形状に影響して、曲げによる残留強度評価の際に、損傷の広がり方向により曲げ強度の相違をもたらした。図2は鋼粒子衝撃後の残留強度を示したもので、特にT方向衝撃の場合では衝撃速度が大きくなると直角衝撃の場合よりも残留強度が低下した。このように衝撃方向による残留強度の相違をもたらした理由は、粒子の斜め衝撃の際の接線成分力が試験片内部にコーンき裂を図3に示したように衝撃方向に対して傾いた形状に生じさせたためである。また粒子衝撃後の残留強度の低下には衝撃速度の垂直成分が大きく影響していることがわかった。

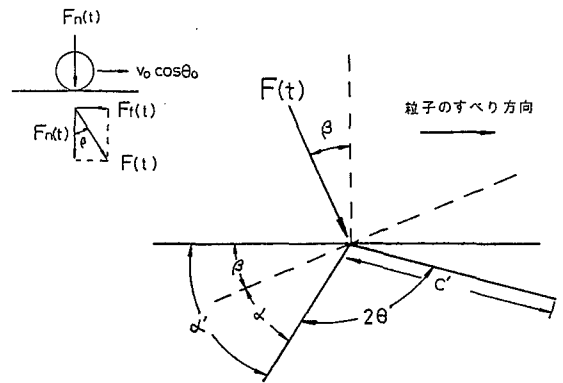


図3 粒子の斜め衝撃により内部に生じたコーンき裂の形状

子衝撃後の残留強度を示したもので、特にT方向衝撃の場合では衝撃速度が大きくなると直角衝撃の場合よりも残留強度が低下した。このように衝撃方向による残留強度の相違をもたらした理由は、粒子の斜め衝撃の際の接線成分力が試験片内部にコーンき裂を図3に示したように衝撃方向に対して傾いた形状に生じさせたためである。また粒子衝撃後の残留強度の低下には衝撃速度の垂直成分が大きく影響していることがわかった。

第4章では、ガスタービン入口温度 (TIT)に近い1473Kの高温環境下で粒子衝撃実験を行い、高温でのセラミックスの変形能の増加が損傷及び残留強度に及ぼす影響を明らかにした。

その結果、高温における粒子衝撃により生じた表面損傷の形態は室温の場合と同様であったが、SiC粒子衝撃の場合には、ラジアルき裂の発生臨界速度が室温の場合よりも約10m/s低下しており、また衝撃速度の増加と共にラジアルき裂やチップングの発生数も著しく増えた。このように室温に比べて2次的き裂が顕著に増大したのは試験片の衝撃点に生じたクレーターの深さが増したことに起因する。その結果を図4に示す。同一衝撃速度に対しては、高温での変形量が室温の場合に比べて増して、より顕著なラジアルき裂やチップングをもたらしたことがわかる。一方、SiC粒子衝撃後の残留強度は、衝撃速度が低い範囲では室温の場合より大きくなっている。これは高温での衝撃部下方への変形の増大による内部での損傷の緩和と炭化珪素の酸化によるき裂の修復に起因したものと考えられる。

第5章では、試験片を1673Kと1523Kの高温で200時間保持して酸化物層を発生させた試験片に対し、室温において粒子の衝撃実験を行って表面損傷への酸化物層の影響を明らかにした。高温ではセラミックスの機械的性質の変化が及ぼす損傷への影響と共に、特に材料が非酸化物系であれば酸化と酸化物層の存在の影響も検討しておく必要がある。

その結果、まず、高温下で長時間保持し表面を酸化させた試験片の曲げ強度は受け入れ材の試験片の強度に比べて目立った変化は見られなかった。酸化物層への粒子の衝突は衝突部に酸化物層のスポーリングが発生し、衝撃速度が増すとその大きさが増した。そのことから高温環境下での粒子衝撃は表面から酸化物層のスポーリングを生じさせてより激しいエロージョンをもたらすことが予

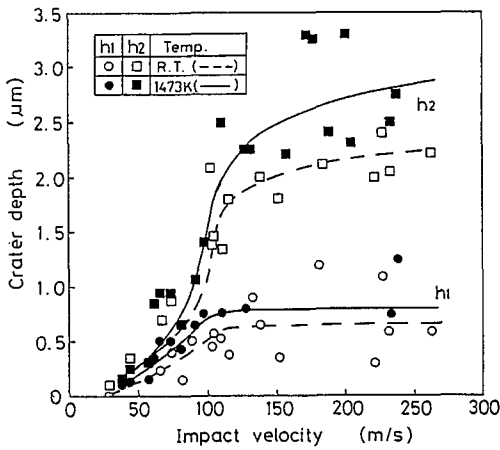


図4 クレーター深さに及ぼす衝撃速度と温度の影響 (SiC 粒子)

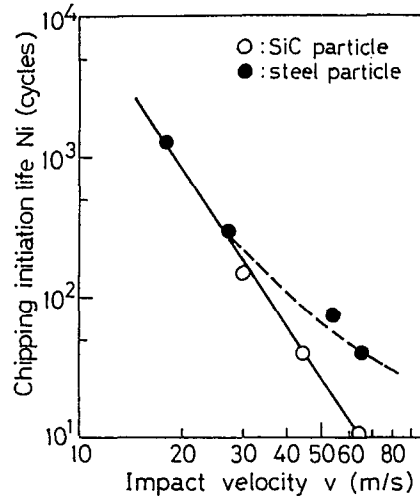


図5 チッピング開始寿命と衝撃速度との関係

想される。一方、粒子衝撃後の残留強度に及ぼす酸化物層の影響は、衝撃速度が低い範囲では酸化物層のない場合に比べてやや大きくなった。それは酸化物層のスポーリングのために衝撃エネルギーの一部が失われるクッション効果によるものである。また表面損傷及び残留強度に及ぼす加熱温度の影響はある温度以上の高温になるとほとんど見られなくなった。

第6章では、粒子の繰返し衝撃より生じる損傷への繰返しの効果を明らかにするために、なるべく衝撃点が散らばらず、また粒子の跳ね返りによる減衰衝撃を与えないような実験装置を試作して研究を行い、これまでの単発衝撃の結果と比較して考察した。

その結果、粒子の繰返し衝撃は表面に重なったリングき裂を生じ、繰返し衝撃回数が増して損傷の累積量が臨界値に達すると表面からチッピングが発生した。そこで粒子の衝撃速度とチッピング開始までの衝撃回数との関係を示すと図5のようになった。衝撃速度が大きくなるにつれてチッピング発生寿命は短くなっており、粒子の繰返し衝撃により生じる損傷の累積には衝撃速度の増加が大きく寄与していることがわかる。一方、残留強度は繰返し衝撃回数の増加と共に低下するが、やがてその影響は小さくなる傾向が見られた。繰返し衝撃回数が増えてチッピングが進むと表面からの材料の欠落が起きるので、その時の粒子の繰返し衝撃当たりの欠損量をエロージョン率と定義して衝撃速度の影響をみると、粒子の種類に関係なく衝撃速度の約3.2乗に比例した。球形粒子の繰返し衝撃によって生じる炭化珪素のエロージョンは重なり合って生じたコーンき裂同士の交差による破壊機構に依存しているが、その程度は粒子との硬さの比に大きく影響され、SiC 粒子の方が鋼粒子の方よりも大きなエロージョン率となった。

第7章は結論であり、以上の結果をまとめて述べた。

審査結果の要旨

炭化珪素 (SiC) はガスタービンの翼用材料として実用化されつつあるが、不燃焼微小粒子などが衝突して損傷を与えれば、その脆性のため破壊事故を起こす恐れもあり、粒子の衝突による損傷形態を解明して、対応技術を確立することが重要な課題となっている。しかし、完全な解明はまだなされていない。

本論文は、実用状態を考慮した諸因子が粒子衝突による SiC の損傷に及ぼす影響を明らかにしたもので、全編 7 章よりなる。

第 1 章は緒論である。

第 2 章では、SiC と鋼の小粒子の静的押し込みと衝突による損傷を比較検討し、表面損傷と内部損傷とは必ずしも対応しないことを指摘している。また、内部に発生するコーンき裂の開き角度は衝突速度が増せば減少することを理論的及び実験的に明らかにし、そのき裂が材料の曲げ強度に及ぼす影響を破壊力学に基づいて考察している。

第 3 章では、粒子が試験片表面に斜めに衝突すると、曲げ強度は曲げに対する衝突の方向によって異なることを、内部き裂の形態の考察結果から明らかにしている。なお、表面上の最外側リングき裂の直径と衝突速度の関係は、衝突速度の垂直成分をとれば角度によらず垂直衝突の結果にはほぼ近くなることを示している。これは SiC の動的破壊の力学的条件を明らかにしていく上で重要な知見である。

第 4 章では、実用環境条件を想定して 1473K での粒子衝突実験を行っている。この結果、高温では 2 次き裂が顕著に観察されたが、き裂の修復により粒子衝突後の強度は室温下での強度よりも高くなることを示している。

第 5 章では、1673K 及び 1523K に長時間保持した場合の酸化の形態を観測し、酸化層は粒子衝突の効果緩和するが、高温になると表面損傷及び粒子衝突後の強度には温度の差はほとんど影響しなくなることを示している。

第 6 章では、独特の方法により粒子の繰り返し衝突実験を行い、表面損傷の累積によるチップングの発生までの衝突回数には粒子衝突速度が大きく影響することを明らかにしている。また、その後のエロージョンによる試験片表面の欠落量は衝突粒子の種類によらず、衝突速度の 3.2 乗に比例することを示している。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は、セラミックスが微小粒子の衝突によってうける損傷を実用状態を考慮して解明し、機械の安全設計の基礎的知見を得ると共に損傷評価にも有用な結果を与えたもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。