小球衝突による炭化ケイ素板の破壊*

鈴木章彦^{*1}, 夏村 匡^{*2}, 杉山茂勝^{*3}
寺前哲夫^{*4}, 浜田晴一^{*4}

Particle Impact Damage in Silicon Carbide

Akihiko SUZUKI, Tadashi NATSUMURA, Shigekatsu SUGIYAMA,
Tetsuo TERAMAE and Seiichi HAMADA

The impact damage that occurred in silicon carbide plates was investigated by projectile impact tests. Target plates of silicon carbide with two different thicknesses were impacted by three kinds of projectiles with various speeds ranging from 30 m/s to 500 m/s. Projectiles were 5 mm ϕ and 3 mm ϕ steel spheres and 5 mm ϕ silicon carbide spheres. Various modes of damage, such as indentation concave, ring and cone cracks, radial and median cracks, lateral cracks, spalling and formation of a percussion cone were observed. The relationship between the mode of damage and the speed or the kinetic energy of the projectile was investigated. The damage caused by the impact load of the present study was very similar to that caused by quasi-static point indentation load. It was also observed that the outermost diameter of ring cracks formulated in the impacted SiC plate was well calculated by the elastic Hertz's impact theory or a modification of it including the effect of the plastic deformation of projectiles.

Key Words: Impact Strength, Brittle Fracture, Ceramics, Particle Impact, Percussion Cone

1. 緒 言

近年、高強度・高品質のファインセラミックスの出現により、これを強度部材として用いることが検討されている。しかし、ファインセラミックスは典型的な脆性材料であり、破壊靱性が低いため、衝撃荷重に対する安全性が懸念されている。ファインセラミックスをターボチャージャロータに適用した例⁽¹⁾では、ガス流中の異物の衝突により、ロータブレード先端が欠ける現象、いわゆるチップングが問題になっている。異物衝突によるセラミックスの破壊機構については、Dao ら⁽²⁾や Knight ら⁽³⁾により行われた広汎な実験的理論的研究および Liaw ら⁽⁴⁾によって行われた破壊過程のシミュレーション計算などによって次第に明らかにされつつあるが、セラミックスを実機に適用するためにはまだ不十分であると考えられ、最近においても種々の検討が続けられている。例えば、チップング限

界⁽⁵⁾、異物衝突後の残留強度^{(6)~(8)}、および小球衝突による破壊のシミュレーション⁽⁹⁾などが検討されている。またこのほかに、衝撃曲げによる破壊⁽¹⁰⁾や繰返し衝撃曲げによる疲労⁽¹¹⁾なども検討されている。ここでは、異物衝突によるセラミックスの衝撃破損の現象理解のため、炭化ケイ素板に種々のスピードで単一小球を衝突させる実験を行ったので、その破損状況観察結果につき報告する。

2. 試 験 方 法

2-1 試験装置および試験方法 図1に用いた試

図1 衝撃試験装置

* 原稿受付 平成2年2月6日。

*¹ 正員、石川島播磨重工業㈱技術研究所 (〒135 東京都江東区豊洲 3-1-15)。*² 正員、石川島播磨重工業㈱空本部 (〒190 東京都西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷 229)。*³ 石川島播磨重工業㈱技術研究所。*⁴ 正員、東京電力㈱技術研究所 (〒182 調布市西つつじヶ丘 2-4-1)。

験装置を示す。供試セラミックス円板を周辺固定条件で支持し、これにプロジェクタイトルを高速で衝突させ、セラミックス円板の破壊の状況を観察した。プロジェクタイトルの加速は火薬を用いて行い、速度のコントロールは火薬の量を加減することによって行った。ただし、この方法では正確な速度のコントロールができないので、衝突前後のプロジェクタイトルの速度を、供試体真上に装着した高速度カメラ(10 000 コマ/秒)によって撮影したフィルムを解析することにより測定した。後述するように、プロジェクタイトルの速さが大きいとパーカッションコーンが形成され、供試体の裏側から離脱するが、その時の速度もこの方法により測定した。また、供試体裏面に数枚の半導体ひずみゲージ(KSP-1-350-E 4, 共和電業)を貼付し、プロジェクタイトル衝突時に生ずるひずみ波形を測定した。ただし、ひずみ測定結果については別報で報告する予定であり、本報では行わない。

2・2 供試体 試験体は旭硝子株式会社製のアルミナを数 Wt % 添加した常圧焼結炭化ケイ素(平均粒径 $10\ \mu$, β 相 90 %, α 相 10 %)であり、直径 $\phi 120$ mm の円板を用い、板厚は 7 mm のものと 14 mm のものの 2 種類を用意した。また、表面粗さは 0.5 S 以下とした。素材の強度は、円板から切り出した 60 本の試験体を用い、JIS R 1601 に準拠した三点曲げ試験を行い求めた。得られた平均強度 σ_f およびワイブル係数 m は

$$\sigma_f = 556 \pm 74 \text{ MPa} \quad (1)$$

$$m = 8.91 \quad (2)$$

である。また、曲げ共振法によって求められたヤング係数 E およびポアソン比 ν は

$$E = 4.12 \times 10^5 \pm 0.01 \times 10^5 \text{ MPa} \quad (3)$$

$$\nu = 0.181 \pm 0.002 \quad (4)$$

である。比重は

$$c = 3.24 \quad (5)$$

である。

2・3 プロジェクタイトル プロジェクタイトルは

表 1 プロジェクタイトル諸元

	Steel ball		Ceramic ball
	1	2	
Material	High Carbon Chromium Bearing Steel SUJ2(JIS G 4805)		SiC
Diameter	5mm	3mm	5mm
Mass	0.510g	0.101g	0.200g
Hardness	> 60 ($H_R C$)		2200 (Hv)
Young's modulus	$2.08 \times 10^5 \text{ MPa}$		$4.12 \times 10^5 \text{ MPa}$
Poisson's ratio	0.30		0.164

$\phi 5$ mm および $\phi 3$ mm の鋼球および $\phi 5$ mm の SiC 球の 3 種類を用意した。プロジェクタイトル諸元を表 1 に示す。

3. 実験結果および考察

3・1 破壊状況 セラミックス等の脆性材料が小球による衝撃負荷を受けると、衝撃応力の負荷・除荷により、リングクラック、コーンクラック、メディア

(a) 衝撃表面

(b) 衝撃裏面

(c) パーカッションコーン破片およびプロジェクタイトル破片

図 2 衝撃試験後の試験体(No. A-1-2)

ンクラック、ラジアルクラックおよびラテラルクラック等が発生する^{(2)~(4)}。図2は比較的速度の大きいプロジェタイルによって供試体が破損した例を示しているが、リングクラックおよびコーンクラックが発達しパーカッションコーンが形成され、それが供試円板の裏側から抜け出すほか、ラジアルクラックおよびメディアンクラックの発達により円板全体が数個に分割された例を示している。また、衝撃エネルギーが大きいことにより、パーカッションコーンは図2(c)に示すようにバラバラになり、衝撃点中央は破碎され貫通孔が生じている。図3は、図2に示した例よりやや衝撃エネルギーの小さい場合に生じたパーカッションコーンを示している。図に見られるように、コーンはほぼ完全な円すい形を示している。この場合、円板にはコーンの抜け穴のほか、ラジアルクラックおよびメディアンクラックが発生するが円板全体を分割するまでに至らない。図4は衝撃点を含む面で円板を切断した面を示している。この図より明らかなように、パーカッションコーンは衝撃中央点直下に生ずるラテラルクラックより下の部分で形成され、貫通孔は生じていない。また、コーンの抜け穴の外側にも、コーンクラ

ックが生じているのが観察される。図2と図4および後出の図7の比較により、パーカッションコーンは衝撃時に発生するヘルツの応力によって形成された複数のリングクラックまたはコーンクラックが発達したものであることは明らかであり、衝撃エネルギーが比較的小さい場合に形成されるパーカッションコーンは最内径のクラックが発達したものであることがわかる。衝撃エネルギーが大きくなると、最内径のクラックの発達によるパーカッションコーンが形成された後、さらに外側のコーンクラックが発達し、玉ねぎの皮をむくような形式のパーカッションコーンが形成されることが図2(c)よりわかる。本実験の範囲内ではプロジェタイルはすべて跳ね返され、貫通した例はなかったが、プロジェタイルのエネルギーがさらに大きくなれば貫通する場合もあることが当然予想される。プロジェタイルのエネルギーが小さくなればパーカッションコーンは形成されず、メディアンクラック等も目視では観察されないが、衝撃点近傍を拡大して見れば、図5に示すような複数のリングクラックが形成されているのが観察される。さらに良く観察すれば、衝突中央点表面のわずかなくぼみと、そのまわりにリング状の盛り上がり形成されているのが見られる。粗さ計を用いてこのくぼみを計測した例を図6に示す。図6に対応するリングクラックも書き込んである。このような試験片を衝撃中心を含む面で切断した図を図7に示すが、表面から観察されたリングクラックは板厚方向に発達し、コーンクラックを形成しているのがわかる。以上述べた破損状況は、供試体の板厚が変化して

図3 パーカッションコーン(No. B-1-7)

図4 パーカッションコーンが生ずる場合の切断面(No. B-1-7)

図5 衝撃点回りのリングクラック(No. B-1-9)

図6 衝撃中心付近のへこみ(No. B-1-9)

も、プロジェクトイルの材質や直径を変えても定性的には変化しないが、供試体の板厚が増大するにつれ、またプロジェクトイルの質量が小さくなるにつれ、損傷はプロジェクトイル衝突直下の局所に限定される傾向があり、パーカッションコーンを形成せしめるプロジェクトイル速度は増大する。 $\phi 3\text{ mm}$ 鋼球あるいは $\phi 5\text{ mm SiC}$ 球を厚さ 14 mm の供試体に衝突させる場合は、パーカッションコーンを発生させるのが困難であり、この場合、プロジェクトイル速度を上げると表面はく離が生ずることが認められた。

3・2 静的破壊との比較 衝撃破壊と静的負荷による破壊との関係を調べるため、材料試験機を用いて静的破壊試験を行った。先端に $\phi 5\text{ mm}$ の鋼球を持つ押し治具を製作し、 $1\sim 5\text{ mm/min}$ の速度で静的に破壊させた。破壊状況を図8に示す。図2に示した衝撃破壊とほぼ同様な破壊状況であった。衝撃破壊と静的破壊の類似性は文献(6)にでも指摘されている。

3・3 パーカッションコーンの体積 図2および図4に示すように、パーカッションコーン抜け穴はほぼ円すい形となる。そこで、試験後の試験体のコーンの抜け穴の平均半径よりパーカッションコーン体積を計算して、図9に示す。図より、パーカッションコーン

体積はプロジェクトイルの速度または種類に応じて連続的に変化する量でなく、その破壊モードに応じた離散値をとることがわかる。これは、図2(c)および図4の破壊状況からも予測されたことである。

3・4 パーカッションコーン発生限界 図10および図11にプロジェクトイル速度とパーカッションコーン速度の関係を示す。これらの図には、参考のため、パーカッションコーンの生じない場合のデータも示してある。これらの図より、パーカッションコーンの生ずる限界のプロジェクトイル速度および運動エネルギーを求め、表2に示す。硬度の大きいSiC球のほうがパーカッションコーン発生に要するエネルギーが大きいことがわかる。

図9 プロジェクトイル速度とパーカッションコーン体積との関係(衝撃試験体1, $t=7\text{ mm}$)

図10 プロジェクトイル速度とパーカッションコーン速度の関係(衝撃試験体1, $t=7\text{ mm}$)

図11 プロジェクトイル速度とパーカッションコーン速度の関係(衝撃試験体2, $t=14\text{ mm}$)

図7 パーカッションコーンが生じない場合の切断面 (No. B-1-8)

図8 静的破壊試験における破壊状況 (載荷裏面, No. A-3-5)

3・5 破壊エネルギー プロジェクトイル衝突前後におけるエネルギー関係式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 E_0 & (\text{衝突前プロジェクトイル運動エネルギー}) \\
 &= E_1 (\text{セラミックスの破壊に要したエネルギー}) \\
 &+ E_2 (\text{衝突後プロジェクトイル運動エネルギー}) \\
 &+ E_3 (\text{パーカッションコーン運動エネルギー}) \\
 &+ E_4 (\text{プロジェクトイル変形・破壊エネルギー}) \\
 &+ E_5 (\text{音, 振動, 熱などによる逸散エネルギー}) \\
 &\dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

式(3)を変形して

$$E_1 + E_4 + E_5 = E_0 - E_2 - E_3 \dots\dots\dots (4)$$

を得る。式(4)の右辺の量を求め、プロジェクトイルの運動エネルギーに対してプロットしてみると、パーカッションコーンの発生および大小に関係せず、図12に示すように線形の関係が得られた。これは E_1 および E_4 よりも E_5 が大きい、すなわち、セラミックスの破壊に要するエネルギーよりも試験体および治具の振動等による逸散エネルギーが大きいことを示し、破壊エネルギーをこの種の実験から求めることが困難であることを示す。

3・6 リングクラックの直径 3・1節で述べたように、衝撃面には複数のリングクラックが発生する。衝

表2 パーカッションコーン発生限界速度およびエネルギー

Target	Projectile	Critical values for percussion cone formation	
		Velocity (m/s)	Energy (J)
SiC plate (t=7mm)	φ5 steel ball	60	0.92
	φ5 SiC ball	120	1.44
	φ3 steel ball	120	0.73
SiC plate (t=14mm)	φ5 steel ball	230	13.5
	φ5 SiC ball	—	—
	φ3 steel ball	—	—

図12 吸収エネルギー(衝撃試験体1, $t=7\text{ mm}$)

撃試験後の試験体表面を24倍実体顕微鏡で観察し、最内側と最外側のリングクラック直径を測定し図13に示す。リングクラックは完全な円を示さず、図4に示すように部分円弧の集合であるが、直径の測定においては、顕微鏡内のスケールを衝撃中心を通るように設定し、スケールと最内側または最外側リングクラックとの二つの交点の距離を直径とした。表面の破壊のため、リングクラックの一部が失われ、直径の測定が不可能な場合は、半径を測定し、その2倍を直径とした。図13においてはパーカッションコーンの発生の有

(a) 5 mmφ 鋼球

(b) 5 mmφ SiC 球

(c) 3 mmφ 鋼球

図13 リングクラック径と Hertz 接触円との比較

無によるデータの区別はしていない。図より、最内側のリングクラック直径はプロジェクトイル速度によらずほぼ一定であるのに対し、最外側のリングクラックの直径はプロジェクトイル速度が大きくなると大きくなることがわかる。プロジェクトイルが供試体に衝突すると、プロジェクトイルと供試体の接触面積は時間とともに増加し、それに伴い作用荷重も大きくなる。そのときの最大引張応力は接触円にて半径方向に生じ、これが供試体の材料強度に一致したときクラックが生ずる。これが最内側のリングクラック径がプロジェクトイル速度によらずほぼ一定であることの理由であると考えられる。いったんクラックが生ずると応力は開放されるが、さらに接触面積が増加し、衝撃荷重が増加すると、破壊の条件が満足され再びリングクラックが生ずる。このようなメカニズムで次々にクラックが形成されることにより、多重リングクラックが生じたものと考えられる。

3・7 接触円直径 3・2節で述べたように、衝撃破壊の様相と静的負荷による接触応力破壊の様相は大変良く似ている。そこで、接触応力に対する Hertz の解析⁽¹²⁾を用いて、衝撃破壊時の接触円直径について考察してみる。図 13 に示した実線は、半無限体に球が衝突したときの弾性理論による接触円直径を示す。理論接触円直径は実験から求められた最内側と最外側のリングクラックの直径の間にあることがわかる。また、プロジェクトイルが SiC 球の場合は、最外側のリングクラックの径と理論値はほぼ一致することがわかる。鋼球の場合に、最外側のリングクラックの径が理論的に求められた接触円直径より大きくなったが、これは鋼球の塑性変形によるものと考えられる。そこで、鋼球の塑性変形を考慮した簡易解析⁽¹³⁾により接触円直径を求めて図 13 中に示した。この解析においては、接触部における面圧は一樣であると考え、その値を 6000 MPa とした。図より、このような計算から求められた接触円直径は、試験より得られたリングクラックの最外周直径とほぼ一致することがわかる。したがって、実験における接触円直径は、最外側リングクラックの直径にほぼ等しいものと考えて良いと思われる。このことは、衝撃損傷を受けたセラミックスの最外側リングクラックの径より作用した衝撃荷重の大きさが

推定できることを示している。また、図 13(a)において、最外側リングクラックの直径は、プロジェクトイル速さが大きい場合、14 mm ϕ の SiC 板に対するよりも 7 mm ϕ の SiC 板に対するもののほうが大きかったが、これは板厚が小さいほうが板としての曲げ変形が大きくなり、それだけ接触円直径が大きかったことによるものと考えられる。

4. ま と め

2 種類の板厚の炭化ケイ素円板に、3 種類の小球プロジェクトイルを種々の速度で衝突させ、炭化ケイ素円板に生ずる破壊の様相を詳しく観察した。衝撃点中央付近には多重のリングクラックが生じ、プロジェクトイルの運動エネルギーが大きいときは、それが発達し、パーカッションコーンが形成され供試体裏側より抜け出すことが観察された。また、小球衝突による衝撃破壊は、小球の静的押付けによる破壊と類似であり、Hertz の接触応力解析が有効なことがわかった。ただし、接触円直径の計算には球の塑性変形も考慮する必要があることがわかった。

文 献

- (1) 佐々木・ほか 3 名, 第 13 回ガスタービン定期講演会講演論文集, (1985-5), 65-70.
- (2) Dao, K. C., ほか 4 名, *Annual Report, Part III, to Office of Naval Research*, (1979).
- (3) Knight, C. G., ほか 2 名, *J. Mater. Sci.*, **12**(1977), 1573-1586.
- (4) Liaw, B. M., ほか 2 名, *Proc. Int. Symp. on Plastic Deformation of Ceramic Materials*, (1984), 709-722.
- (5) Masda, M., ほか 3 名, *Proc. 3rd Int. Symp. on Ceramic Materials and Components for Engines*, (1988), 1031-1038.
- (6) 峰松・ほか 4 名, 旭硝子研究報告, **38-2**(1988), 233-245.
- (7) Akimune, Y., ほか 2 名, *J. Am. Ceram. Soc.*, **72-8**(1989), 1422-1428.
- (8) 浜田・寺前, 第 5 回破壊力学シンポジウム講演論文集, (1989-9), 180-184.
- (9) 寺前・浜田, 機論, **55-520, A**(1989), 2423-2426.
- (10) 淡路・山田, 文献(8)の 185-189 ページ.
- (11) 岡部・ほか 3 名, *J. COSSOR'87 論文集*, (1987), 483-488.
- (12) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, 3rd ed. (1970), 420-422, McGRAW-HILL.
- (13) 寺前・浜田, 日本機械学会関西支部第 65 期定時総会講演概要集, No. 904-1 (1990-3), 56-57.