微小球衝突による黒鉛材料のスポール破壊

田邊靖博, 佐々木健一, 赤津隆, 安田榮一

(平成9年5月16日受理, 平成9年8月20日採択)

Spall Fracture of Graphite Materials by Impact of a Small Projectile

Yasuhiro TANABE, Ken-ichi SASAKI, Takashi AKATSU and Eiichi YASUDA

Three types of polycrystalline graphites and two 2D-C/C composites were impacted by a steel projectile of 4-mm diameter with a velocity of 0.7km/s to 1.7km/s. The damage behavior by impact, especially, spallation of stress wave, shape of scattered fragments (debris), and the observation of debris by a high speed camera. The followings were concluded: (1) Critical velocity of spallation in graphites increased with increasing their static strength and thickness of the specimen, (2) weak-bonded layers in 2D-C/C composite was easily debonded (peel-off) at the interfaces by impact, (3) in C/C composites debonding region near the rear surface was larger in the case a projectile stopped in them than in the case it passed through them, (4) shock waves in graphites could be measured using acoustic emission sensor, (5) the size of the spalled fragments depended on the material properties even among polycrystalline graphites, and (6) a model of spalling process in a polycrystalline graphite was proposed.

KEYWORDS : Spall, Polycrystalline graphite, C/C composite, Impact damage, High speed camera

1. はじめに

セラミックス基複合材料, 中でもC/C複合材料は, ガスタービンブレードへの応用研究が開始されている。C/C複合材料をガスタービンブレード等として利用する場合, 静的な破壊だけではなく異物粒子の衝突による動的な材料の損傷あるいは破壊 (以下FOD: Foreign Object Damage) を考慮した設計を行う必要がある¹⁾。

現在までのFODに関する研究は, 主として金属材料あるいは繊維強化プラスチック (以下FRP: Fiber Reinforced Plastics) について行われており, セラミックスについてもSi₃N₄を始めとするモノリシック材料については行われている^{2)・4)}。しかし, これらの研究は, 主としてガス銃を用いているため500m/s付近までの低速度域での研究である。この速度域でセラミックスに生じる損傷はクラックが主となり, 接触理論を用いて接触破壊を衝撃損傷と結びつけた解析がなされてきた。これら損傷状態は, 試料として用いたセラミックスのヤング率や破壊靱性, ポアソン比³⁾, 飛翔体と試料の強度比, 硬さの比⁶⁾などと密接な関係があると考えられている。高速域 (1.0km/s以上) になると損傷の様相はまったく異なってくることが予想される。しかし, 1.0km/s以上の高速衝突の研究は, 筆者らの調べた限りほとんど報告されていない⁷⁾。

今後, C/C複合材料を始めとしてセラミックスをFODが問

題となる用途に利用拡大するためには, 異物粒子との衝撃損傷を解明することは不可欠である。前述したようにセラミックスのFODに関する既往の研究はそのほとんどが低速度域 (500m/s以下) で行われ, 衝撃損傷を静的な物性値から類推しようというものである。高速で回転するガスタービンのローターなどでは飛来粒子との相対速度は, 約1.0km/sにまで達する。工業的な安全率を考慮に入れるとより高速な (2.0km/s程度まで) 衝突試験を行う必要がある。著者らは, 飛翔体としてMn-Znフェライト球あるいはスチール球を用いて黒鉛材料へ約1.7km/sまでの衝撃試験を行い, 衝撃損傷を静的機械的特性と結びつけてきた^{8)・9)}。この結果, 黒鉛材料ではスポール破壊が発生し, 衝突速度がある値以上になるとスポール破壊による質量欠損は衝突速度に依存せず一定となることを示した。スポール破壊で生じた破片は, 部材の破損だけではなく, 装置そのものの破壊を誘発する危険性を含んでいる。したがって, スポール破壊に関する知見を得ることは, 非常に重要である。

そこで, 本研究では, 球状飛翔体を用いた衝撃試験を行い, C/C複合材料ならびに黒鉛材料への高速粒子の衝突によるスポール破壊を中心とした衝撃損傷を評価するための基礎を構築することを目的として, 応力波の伝播, スポール破壊破片の観察などの実験を行った。

2. 実験方法

2.1 衝撃試験

2段式軽ガス銃 (HS-2B : NRD製) を用いて、直径4mmのスチール球 (密度 : 7.8g/cm³, ピッカース硬さ : 7.0GPa (JISR1610-1991標記 : 7000HV) , 質量0.261g) を飛翔体として円柱形試料の中心に衝突させた。飛翔体速度は、0.7km/s ~ 1.7km/sの範囲とした。2段式軽ガス銃の動作原理ならびに実験方法の詳細は、文献 (8) に記してあるのでそちらを参照されたい。

試料には、密度が同程度で組織の異なる多結晶黒鉛 (G151A, G347, G540) ならびに2D-C/C-A, 2D-C/C-Bを用いた。用いた試料の特性をTable 1に示す。C/C複合材料の場合、寸法の制約から飛翔体進行方向に対し繊維配向方向が垂直になる試料を使用した。試料寸法は、C/C複合材料が直径65mmで厚さ20mmと30mm、黒鉛材料が直径65mmで厚さ20mm, 30mmと40mmである。

まず、衝撃損傷を質量欠損と試料密度から求めた飛散容積で評価した。飛翔体速度が高速になると衝突面と反対の面 (以下試料後面) にスポール破壊 (試料後面側に観察される損傷あるいは破壊) が発生する。本実験では、このスポール破壊の容積を測定するために回収容器を用いて試料後面から飛散する破片の回収を行った。

スポール破壊した領域あるいはクレータ (飛翔体衝突面 (前面) 側にできる窪み状の損傷領域) を含む横断面を光学顕微鏡を用いて観察した。試料の切断には、刃厚0.8mmの炭化珪素製回転式カッター刃を用いた。

多結晶黒鉛材料に微小球を高速で衝突させた場合、クレータおよびスポール破壊領域は、試料の中側に頂点を持つ円錐状となる^{8), 9)}。結果の項で詳しく述べるが、本実験では条件によってはクレータとスポール破壊の明瞭な境界が観察できない場合があった。この場合、便宜的に、試料前面側での損傷・破壊領域をクレータ、後面側での損傷・破壊をスポール破壊

と呼ぶ。

2.2 応力波伝播速度

本実験ではスポール破壊をもたらす応力波の伝播を調べるため、試料後面の三カ所に歪みゲージとAE (Acoustic Emission) センサを貼付け、到達時間の相違と飛翔体との衝突点との距離から試料内部を伝播する圧縮応力波の伝播速度を計測した。

本実験で用いた歪みゲージは、(株)昭和測器社製のゲージ長さ2mmの1軸歪みゲージ (N11-FA-2-120-11-VSE1) , AEセンサは、(株)NF回路設計ブロック社製の広帯域形AEセンサ (AE-900M-WB) である。スポール破壊が生じることによって正確な波形が取れなくなることを防ぐため、スポール破壊を起こさない条件 (飛翔体速度と試料厚さ) で実験を行った。また、伝播形態を推察する目的から、等方質に近いと考えられる多結晶黒鉛材料のみを試料として用いた。AEセンサの取付け位置が歪みゲージの位置と重ならないように、1つの試料に対し歪みゲージを2つ、AEセンサを1つ取り付けた。

歪みゲージ、AEセンサの波形はそれぞれアンプを通してオシロスコープ (横河電機株式会社製DL1540) に表示させ、パーソナルコンピュータ上で処理を行った。トリガーとして飛翔体速度計測で使用する誘導起電力の出力波形を用いた。歪みゲージ信号は、Low Pass Filter (200kHz) を通して出力した。一方、AEセンサ信号は、High Pass Filter (100kHz) , Low Pass Filter (2MHz) を通して出力した。試料後面に到達する波は周波数がまったく不明なため、歪みゲージ、AEならびに各アンプの特性を考慮に入れて低周波数の波は歪みゲージ、高周波数の波はAEで捉えられる設定となる様に心がけた。

2.3 破片分布ならびに破片撮影

スポール破壊によって試料後面から飛散した破片 (以下破片とはすべてスポール破壊によって生じたものを指す) の寸法分布を知るために、回収した破片から0.01g以上の破片の質量ヒストグラムを作成した。

Table 1 Mechanical Properties of graphites and C/C composites used in this study.

Specimen	Bulk density	Bending Strength	Elastic modulus	Inter-layer shear strength	Maximum particle size
	g/cm ³	MPa	GPa	MPa	mm
G151A	1.80	27	12.5		1.0
G347	1.85	49	13.8		0.1
G540	1.85	98	15.0		0.01
2D-C/C-A	1.65	206	117 (T) 195 (P)	12.4	
2D-C/C-B	1.60	81	56 (T) 68 (P)	18.0	

Shear strength is measured by a double notched compression method.

Elastic modulus is measured using a strain-gage.

T : Transversal, P : Parallel to the cloth-plane direction.

高速度カメラFlashCam (PCO Computer Optics GmbH) を用いてスポール破壊によって飛散する破片を観察した。カメラは、破片の飛散軌跡が見えるように飛散体の運動方向に対し垂直に設置した。露光時間はすべて50 μ sとした。遅延時間は、後面での応力波 (AE) 到達時からの時間としてカメラ側で設定した。

3. 結果と考察

3.1 飛散容積

多結晶黒鉛における飛散容積と試料材質との関係をFig.1に示す。20mm, 30mm厚試料ともに、G540>G347>G151Aの順に容積が小さくなった。クレータの生成⁸⁾と同様に、有効破壊エネルギーおよび散逸エネルギーの割合が大きくなるにつれ飛散容積が小さくなった。厚さが40mmと厚くなると、クレータの場合⁸⁾と異なり、材質による飛散容積の違いが明確では無くなった。

C/C複合材料の結果を同じくFig.1に示す。飛散容積は明らかにC/C複合材料の方が小さい。C/C複合材料間の試料材質による飛散容積に差が現れないのは静的機械的特性に大きな差がないことに対応していると考えられる。また、試料厚さによる違いが小さい。衝撃エネルギー250J以下の試料では、衝

撃エネルギーにも依存していない。

これらの現象は、定性的には、次の様に説明できる。実際には、飛散容積は試料の力学特性、試料厚さならびに飛翔体の運動エネルギー (衝撃エネルギー) の関数であると推察される。ある程度以上の厚さになると、飛翔体は試料内で大きな抵抗を受けて減速する。スポール破壊は、飛翔体が直接引き起こす破壊ではなく、飛翔体と材料との衝突時に発生する圧力が大きな役割を果たしている。本実験の範囲では、密度を揃えてこの圧力差が小さくなるように材質を選定してある。したがって、材料と飛翔体との直接的な相互作用で発生するクレータ容積には大きな材質依存性が認められるが、飛散容積の大部分を占めるスポール容積では材質依存性が少なくなる。その結果として、厚い試料では飛散容積に大きな材質依存性が認められない。

3.2 横断面の観察

黒鉛材料の結果をFig.2に示す。G151A, G347, G540のスポール破壊は、形状が異なることがわかる。G347ではスポール破壊した領域の外側に大きな亀裂が発生していた。この亀裂は試料後面からクレータースポール破壊の境界に向けて伸びており、準静的な押し込みによって生じるコーンクラックや寺前ら¹⁰⁾の実験で生じたパーカッションコーンの様に

Fig.1 Scattered volume of the graphites and c/c composites as a function of impact energy. (a) graphite in 20mm thickness, (b) graphite in 30mm thickness, (c) graphite in 40mm thickness, (d) C/C composites.

Fig.2 Cross sectional view of 20-mm thick graphites. (a) G151A impacted at 1090 m/s, (b) G347 impacted at 1020 m/s, (c) G540 impacted at 1070 m/s.

衝突面の応力によって生じる亀裂とは異なるものである。また、写真では確認し難いが、G540の横断面には比較的多数の長い亀裂（矢印）が生成していた。これらの大きな亀裂は、G151Aには認められないことから、スポール破壊においても、クレータ生成と同様に準静的な有効破壊エネルギーの大小で亀裂の生成が説明できる。

C/C複合材料の結果をFig.3, 4に示す。20mm厚C/C複合材料試料同士を比較すると、1140m/sで飛翔体を衝突させた2D-C/C-A (Fig.3-a) では、層間剥離が試料後面付近で広範囲に広がり、剥離部分は後面付近が最も大きくクレータの底に向かって徐々に小さくなっている。これはFRPで見られる逐次的層間剥離メカニズムと同様の現象と推察される¹¹⁾。一方、1700m/s付近では飛翔体は試料を貫通する。この試料では、飛翔体が通過した後面付近に繊維の大きな捲れが観察されるが、試料に明確な層間剥離は見られない (Fig.3-b)。飛翔体の貫通の有無により破壊挙動が異なることが示された。亀裂の進展速度以上で飛翔体が試料内を進行する場合、亀裂が進展し終わる前に飛翔体が試料から飛び出すことは容易に想像される。亀裂の発生場所と亀裂進展速度あるいは飛翔体速度との関係は、現時点では不明であるが、今後の重要な検討課題である。

飛翔体が貫通した2D-C/C-Aと2D-C/C-Bとを比較すると、2D-C/C-Aの方が、試料後面の繊維の捲れは大きい (Fig.3-b, c)。30mm厚試料同士を比較すると、2D-C/C-Aでは中心付近で完全な層間剥離が発生している (Fig.4)。2D-C/C-Bでは、2D-C/C-Aと比較して衝突速度が遅いにもかかわらず、2カ

Fig.3 Cross sectional view of 20-mm thick C/C composites. (a) 2D-C/C-A impacted at 1140 m/s, (b) 2D-C/C-A impacted at 1750 m/s, (c) 2D-C/C-B impacted at 1710 m/s.

Fig.4 Delamination of 30-mm thick C/C composites. (a) 2D-C/C-A impacted at 1790 m/s, (b) 2D-C/C-B impacted at 1270 m/s.

所で大きな剥離を起こしている。30mm厚の2D-C/C-Bは一度熱圧成形したC/C複合材料の間にプリプレグシートを挟んで数個重ねた後に、再度、熱圧成形したものである。界面接着強度の弱いと推察される（プリプレグシート面での剪断強度：8.0MPa）プリプレグシート上で剥離が発生したためと考えられる。一方、2D-C/C-Aは、一回の熱圧成形で作られているため接着強度の特に弱い界面は存在しない。2D-C/C-Aの中央付近の剥離は、飛翔体が停止した付近で生じており、希薄波（圧縮衝撃波が試料後面で反射し、膨張（引張）希薄波として試料内部に戻ってくる）によって生じた層間剥離とは考えにくい。この層間剥離は、飛翔体貫入によって発生する応力によって直接的に発生したものと考えられる。厚い試料では衝撃エネルギーを試料内部の数カ所に生じる大きな剥離と、希薄波がもたらす試料後面付近の層間剥離とで消費することが示唆される。

3.3 スポール臨界点

40mm試料でスポール臨界速度を比較すると、G540>G347>G151Aの順で小さくなっている（Table 2）。G540>

G347>G151Aの順で曲げ強度が低い（Table 1）。スポール破壊臨界速度は、静的な強度に対応した特性と捉えることができる。

試料厚みとスポール臨界速度の関係について見ると、G347、G540では、厚くなるにつれスポール臨界速度は大きくなった（Table 2）。試料内を伝播する応力波の伝播距離が長いほど減衰が大きくなるためと考えられる。残念ながら、G151Aではスポール臨界速度が低いために、今回の実験では厚みとの関係を十分には検討できなかった。表中、不等号で示している値は、臨界速度がそれ以上あるいはそれ以下であることを示している。

20mm厚試料のスポール容積は本実験範囲では衝撃エネルギーに大きく依存しない（Fig.5）。試料が30mmと厚くなると、G151Aでは20mm厚の試料と同様に飛散容積ならびにスポール容積ともに衝撃エネルギーに大きく依存しない傾向を示すが、他の試料では衝撃エネルギーの増加に伴って、飛散容積ならびにスポール容積が増加する傾向を示し始めている。詳細は、今後の検討課題である。

複合材料のスポール破壊は、希薄波の引張り応力による層間剥離も含む^{(12), (13)}。したがって、Fig.3の1140m/sでの層間剥離は、スポール破壊である。Table 2では、希薄波による層間剥離もスポール破壊としてある。本実験の範囲では、2D-C/C-Aよりも剪断強度の高い2D-C/C-Bの30mm厚試料においては、後面付近の層間剥離は起こらなかった。C/C複合材料においては、剪断強度が高い材料ほど、剥離破壊が少ない（小さい）ことが確かめられた。

3.4 応力波伝播速度

スポール破壊は試料後面に到達する圧縮応力波およびその反射希薄波によって生じる。既往の研究では、これを計測するのにさまざまな手法が用いられ、武田らは歪みゲージを用いてFRPの応力波を計測し⁽¹⁴⁾、Reedらは水晶振動子でFRPの応力波（衝撃波）を計測している⁽¹⁵⁾。本研究においても、圧縮

Table 2 Critical velocity for spallation.

Specimen	Critical velocity
G151A-20mm	< 1020 m/s
G347-20mm	< 1027 m/s
G540-20mm	< 1070 m/s
G151A-30mm	< 1200 m/s
G347-30mm	650-1220 m/s
G540-30mm	1120-1590 m/s
G151A-40mm	810-1180 m/s
G347-40mm	1190-1750 m/s
G540-40mm	> 1720 m/s
2D-C/C-A-20mm	< 1140 m/s
2D-C/C-B-20mm	910-1380 m/s

The sign of inequality indicates that the critical velocity is under or above the indicated value.

Fig.5 Spalled volume of the graphites as a function of impact energy. (a) 20-mm thickness, (b) 30-mm thickness, (c) 40-mm thickness.

Table 3 Calculated velocities of the specimens from their elastic constants.

Specimen	Longitudinal wave velocity m/s	Transversal wave velocity m/s
G151A	2635	1635
G347	2731	1681
G540	2847	1766
2D-C/C-A (T)	8421	5639
2D-C/C-A (P)	10871	6572
2D-C/C-B (T)	5916	3652
2D-C/C-B (P)	6519	3868

T : Transversal, P : Parallel to the cloth-plane direction.

Table 4 Measured wave velocities.

Specimen	Wave velocity m/s	Impact velocity m/s
G151A	600 (SG)	810
G347	1040 (SG)	930
	1000 (SG)	930
G540	610 (SG)	870
	670 (SG)	870
	3370 (AE)	1330

SG : Strain gage, AE : Acoustic emission sensor

応力波を歪みゲージとAEを用いて実験的に計測し、スポール破壊との関係について調べた。

等方無限媒体を仮定して各材料の弾性定数、密度を用いて算出した縦波速度¹⁶⁾と横波速度¹⁶⁾を示す (Table 3)。応力波伝播速度の測定結果をTable 4に示してある。AEで計測した伝播速度は弾性波速度よりも速い (Table 4)。試料内部に衝撃波が発生したと考えられる。Hugoniot¹⁷⁾を用いて密度1.88g/cm³の黒鉛にSUS304が1.3km/sで衝突したときの衝撃波速度を求めると4.1km/sとなる。今回は試料厚みが40mmと厚い試料であるため、試料内部で分散が起こり、3.4km/sに減速したと推察できる。AEセンサーで黒鉛材料中の衝撃波の到達を計測できることが分かった。

一方、歪みゲージで計測した波は、各試料とも異なる場所ではほぼ同じ伝播速度が得られ、その値はAEで求めた速度と比較して遅くなった (Table 4)。歪みゲージで計測できた波の速度は、計算から求めた横波速度の半分以下である。本条件では、明らかにAEとは異なる波を計測している。

3.5 破片分布

20mm厚試料を用いて1600m/s付近の速度で衝突させた時の黒鉛材料の破片の質量ヒストグラムをFig.6に示す。今回測定しなかった0.01g未満の破片の質量の各々の試料での総和は、約0.8g (G151A), 1.2g (G347), 1.8g (G540)であった。破片の個数は、G151AよりG540が多くなった。G347はその中間であった。また、G151A<G347<G540の順で大きな

Fig. 6 Histograms in the number of spalled fragments above 0.01g as a function of each mass. (a) G151A, (b) G347, (c) G540.

破片が数多く認められた。これらも有効破壊エネルギーで整理できる。

3.6 破片撮影

G540の20mm厚試料に約1500m/sで飛翔体を衝突させ、スポール破壊によって生じる破片が飛散している瞬間の写真撮影に成功したので、その結果 (Fig.7) について述べる。中心付近に認められる円形の明るい部分に撮影用の照明を集中してあてている。

スポール破壊直後の破片は、貫通した飛翔体とともに中心付近に集中している (Fig.7-a : 遅延時間350μs)。中心部分の閃光は、写真撮影用の光源ではなく、破片自身が高温で発生する輻射光である。Fig.7-b (遅延時間550μs) の写真から、

Fig.7 High speed photographs on spalled fragments from the rear surface of G540. (a) impacted at 1610 m/s in 350μs delay, (b) impacted at 1610 m/s in 550μs delay, (c) impacted at 1610 m/s in 600μs delay, (d) the view for fragments' photographs.

破片が試料後面から放射状に飛散しているのがわかる（円形の光源内に黒い軌跡として捉えられている）。写真左側の閃光（矢印）は、飛翔体がバンパー板に衝突して跳ね返った軌跡である。飛翔体の軌跡と外側の飛散破片とのなす角度は、約 14° であった。この写真では、飛翔体以外には、閃光が認められない。試料の温度は、200μs程度の短い時間でかなり低下

Fig.8 Video tape recorder photographs on spalled fragments from the rear surface of G540. (a) impacted at 1610 m/s, (b) after above 30ms from the photo (a).

することがわかる。**Fig.7-c**（遅延時間600μsec）の写真では、**Fig.7-b**で見られた中心付近に集中する破片が更に進んでいるのがわかる。また、総じて軌跡の長さが短く太くなっており、**Fig.7-b**で捉えられている破片と比較して速度が遅く大きな破片が飛散している様子がわかる。

通常のビデオ（VTR）撮影によって得られた写真を**Fig.8-a, b**に示す。**Fig.8-b**は、**Fig.8-a**から33ms後となる。これらの写真ではスポール破壊が始まってからの正確な時間は分らないが、**Fig.7**よりも十分遅い時間（30ms以上の時間遅れがある）であり、初期には見られない大きな破片が認められる。また、この大きな破片は、**Fig.7**で認められた小さな破片と比較して、広角度に分布していることがわかる。**Fig.8**は、通常のVTR撮影の1コマであり、シャッター開放（露出）時間は、**Fig.7**の50μsと比較して遥かに長い。このことと、**Fig.8-a, b**で破片の輪郭が明確なことから、**Fig.8-a, b**の大きい破片は**Fig.7-b, c**で写っている破片と比べると遥かに低速で飛散していることになる。

Fig.7-aでみられた明るい先端の軌跡が飛翔体であり、シャッター開放時間（50ms）を考えると、この間の平均速度は約600m/sとなる。衝撃速度の2.5分の1に減速している。**Fig.7-b**から飛翔体は、破片よりも速い速度で飛んでいることがわかる。先に算出した600m/sは、歪みゲージで捉えた波の速度と同程度である。試料中を進む飛翔体は、600m/s以上であることは明かである。したがって、試料の破壊の大部分は、飛翔体が試料を貫通した後に発生していることになる。Senf等は、K5ガラスを用いて亀裂進展をもたらす波の速度は横波速度以下であることを示し、衝突速度が増加するにつれ、その波の

速度は増加することを報告している¹⁸⁾。本実験では、歪みゲージで測定した600m/s程度の波が、Senf等が指摘しているスポール破壊を実際に引き起こす波に相当すると推察される。

4. 黒鉛材料のスポールモデル

質量ヒストグラム、写真撮影の結果をまとめてG540（高強度黒鉛材料）のスポール破壊発生過程のモデルを提案する。

写真撮影で始めに飛散する細かな破片は、試料中心部分（スポール破壊中心と仮定）から約 14° の角度であり、それから50 μ s経過した後もほぼ同程度の角度で大量の破片が飛散していることが分かった。Fig.8-bから比較的大きな破片が広範囲に飛散しているのがわかる。

これらの結果から、G540ではスポール破壊は、大きく2つの段階に分けることができる。第一段階では、数多くの小さな飛散破片が、スポール破壊中心から比較的小さな角度以内で高速に飛散する。しばらく時間が経つと大きい破片が飛散する第二段階となる。この破片は初期のものに比べて広い角度で飛散し、その速度は非常に遅い。今回の実験ではFig.7-cからFig.8-aまでの正確な時間差が分からないが、ビデオカメラの性能を考えると30ms以上の時間差があると考えられる。

Fig.9は回収した破片を元あったと考えられるところに戻したものである。破片の寸法から考えて、上の写真がスポール破壊第一段階が終了し第二段階に移行した直後、下が第二段階が終了した後である。スポール破壊は第一段階と第二段階とで破片の形状・寸法が変化している（Fig.7, 8, 9）。大きな破片は、その形状から試料後面からスポール破壊の中心部分に向かう亀裂が進展して飛散したことを伺わせる。スポール破壊が始まってから、亀裂が進展して大きな破片が飛散するまでに十分な時間がある。スポール破壊の第二段階は、試料後面から生じる大きな亀裂が試料内部、あるいは中心部に

向かって進展して、破片として飛散する過程である。これらを図示するとFig.10で表せる。

Fig.9 Spalled fragments of G540 impacted at 1610 m/s. (a) Between first stage and second stage, (b) after second stage.

Fig.10 A schematic model of spallation in G540.

5. まとめ

多結晶黒鉛材料ならびにC/C複合材料に直径4mmのスチール製飛翔体を衝突させた場合に、試料に発生するスポールを中心とする衝撃損傷挙動について飛散容積、応力波の伝播、飛散試料の形状・分布ならびに写真撮影から考察し、次の知見を得た。

- (1) 黒鉛材料のスポール臨界速度は、静的な強度が大きく、厚い試料ほど大きくなる傾向がある。
- (2) 2D-C/C複合材料では、剪断強度の弱い層があると、その層で選択的に剥離破壊を起こす。
- (3) C/C複合材料では、飛翔体が試料を貫通する場合には試料後面での目立った剥離破壊は観察されない。しかし、試料内で停止した場合には試料後面での大きな剥離破壊が観察される。
- (4) AEを用いて黒鉛材料中を伝播する衝撃波を捉えることができる。
- (5) スポール破壊によって生じる破片の寸法は、多結晶黒鉛の材質によって異なる。本実験範囲では、平均してG540が大きく、G151Aが小さく、G347はその中間であった。
- (6) G540を代表として、黒鉛材料のスポール破壊過程のモデルを提案した。

謝 辞

有意義なコメントを頂いた澤岡昭 東京工業大学教授に感謝します。C/C複合材料試料の作製にあたり御尽力頂いた東洋炭素㈱に感謝します。本研究の一部は、科学研究費補助金および高度化推進経費により行いました。

文 献

- 1) 和田 重孝, 材料科学, **29** [5] (1992) 252-257.
- 2) 木村 雄二, セラミックス, **30** [8] (1995) 649-651.
- 3) 浜田 晴一, 寺前 哲雄, 材料, **41** [467] (1992) 1273-1278.
- 4) J. Cuccio, H. Fang, T. Lester, and J. Song, *Proc. Automat. Technol. Dev. Contract Coordination Meetings*, **27** (1990) 1613-1619.
- 5) Y. Akimune, Y. Katano, and K. Matoba, *J. Amer. Ceram. Soc.*, **72** [8] (1989) 1422-1428.
- 6) J. Sternberg, *J. Appl. Phys.*, **65** [9] (1989) 1529-1541.
- 7) Y. Tanabe, T. Saitoh, O. Wada, H. Tamura and A. B. Sawaoka, *Report of RLEM TIT*, No.19 (1994) 223-244.
- 8) Y. Tanabe, T. Saitoh, T. Akatsu and A. B. Sawaoka, *Carbon*, **33** (1995) 1547-1552.
- 9) 田邊靖博, 佐々木健一, 赤津隆, 安田榮一, 炭素, **1997**, [No.176] (1997) 26-28.
- 10) 寺前 哲夫, 浜田 晴一, 日本機械学会論文集 (A 編), **57** [535] (1991) 485-491.
- 11) 武田 展雄, 日本複合材料学会誌, **12** [1] (1986) 23-27.
- 12) D.M. Schuter and R.P. Reed, *J. Composite Materials*, **3** (1969) 562-576.
- 13) D.A. Gorham and J.E. Field, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, **9**, (1976) 1529-1541.
- 14) N. Takeda, R.L. Sierakowski and E. Malvern, *J. Composite Materials*, **15** (1981) 157-174.
- 15) R.P. Reed and D.E. Munson, *J. Composite Materials*, **6** (1972) 232-257.
- 16) 「音速」, 物理学事典, 培風館 (1984) pp.257-258.
- 17) S.P. Marsh : editor "LASL Shock Hugoniot Data" University of California Press., Berkely, USA (1980) p.44 [graphite], p.213 [SUS304]
- 18) H. Senf, E. Strassburger and H. Rosthenhaesler, *Metallurgical and Materials Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*, ed by L.E. Murr, K.P. Staudhammer and M.A. Meyer, Elsevier Science B.V., England (1995) pp.163-170.