

デブリ防護における斜め衝突の優位性

塩田一路^a, 田中孝治^b, 明井宏樹^c, 桑折仁^c,
矢ヶ崎隆義^c, 湯本敦史^d, 加藤雅彦^a, 佐々木進^b

^a サレジオ高専, ^b 宇宙科学研究所, ^c 工学院大学, ^d 芝浦工業大学

概要

近年、化石燃料による二酸化炭素の増加、および化石燃料の枯渇が問題となっている。宇宙太陽光発電(SSPS)はそれらの問題解決の有力な手段と考えられている。SSPSは大きな太陽電池と発生した電力を地上に送る装置から構成される。その実用化において、デブリとの衝突が問題となる。デブリは7 km/s以上の速度で地球を周回しており、その大きな速度のため大きな運動エネルギーを有する。もしデブリの欠片がSSPSに衝突すると、SSPSは容易に破壊されてしまう。これまでSSPSとデブリの衝突に関し多くの報告がなされている。我々は、一方向配向の炭素繊維シートを交差配向して積層したCFRPを用い、それにプロジェクタイトルを斜め衝突させることにより薄くて軽量のCFRP防護パネルの構築の可能性を報告した。

本研究では、平織りの炭素繊維シートを積層したCFRPを用い、斜め衝突による防護性能に対する基礎的な検討を行なった。その結果、衝突角度が60°まではプロジェクタイトルがCFRPパネルを貫通せず、衝突後はパネル表面に沿って飛翔することが認められた。この結果を基礎として、薄くて軽量な新しい防護パネルの提案をする。

Keywords: CFRP, SSPS, デブリ, 斜め衝突

1. 緒言

現在の主エネルギー源は化石燃料であり、その使用に伴う二酸化炭素の排出、および化石燃料の枯渇が問題となっている。原子力はクリーンエネルギーと言われてきたが、一旦事故が起きると人類にとって危険な放射性物質を放出する。

太陽光発電は、将来における持続可能なエネルギーと期待され、また地球温暖化の対策として期待される。太陽光発電は地上においても構築することができるが、空気の影響、天候の安定性、昼夜があることで発電効率が制限される。

一方、太陽光発電システムを宇宙に構築する場合、コストはかかるが、上述のような制限は受けない。宇宙太陽光発電システム(SSPS)は、大面積の太陽光電池と、発電した電力をレーザあるいはマイクロ波で地上に送る装置から構成される。実際にSSPSを構築する場合、スペースデブリが大きな問題となる。デブリの速度は7 km/s以上もあり、その運動エネルギーは極めて大きい。直径が約10 cm以上のデブリは地上からの観測が可能で、人工衛星の方でそれを避けることができる。一方10 cm以下のデブリは現在の技術では捕捉できず、したがって避けることもできない。

太陽光電池部分は極めて大きいので、防護板を設けることができない。もう一つの主要な構成部分は発電した電力をレーザまたはマイクロ波で地上に送る装置であり、太陽光電池部分と比較すると小型である。しかし、一旦この部分が破壊されると、電力を地上に送ることができなくなり、致命的である。したがって、この部分を防護することはSSPSの実現にとって不可欠である。

人工衛星のデブリ衝突に関しては、多くの報告がなされている。それらのうち、斜め衝突についての議論の場合の主題は破壊機構であり、防護機能が主題ではない[1][2]。また防護機能を想定した議論では垂直にデブリが衝突することを想定している[3]。デブリが防護板に垂直に衝突する場合、全運動エネルギーは防護板の破壊または熔融蒸発で消費されなければならない。したがって、衛星の機器の防護のためには厚くて重い防護板が必要となる。

以上に対し、本論文ではSSPSの防護板に対して斜めにデブリを衝突させる構造を提案する。斜め衝突の場合、防護板はデブリの進行方向をそらせるだけで、全運動エネルギーを吸収する必要がない。したがって、垂直に衝突する場合よりも薄くて軽い防護板で衛星の機器を防護する効果を期待できる。

2. 実験方法

ターゲットとしては、3, 10, 15 および 20 mm の厚さのCFRPパネルを用いた。3 mm厚さのパネルは斜め衝突実験に用い、他のものは垂直衝突実験に用いた。パネルは、東レT700Sの炭素繊維を用い、1本のヤーンが12,000本の単繊維よりなる平織りのシートの積層材である。炭素繊維と母材エポキシ樹脂の特性をTable 1に示す。平織りのシートの構成は、[0/90,30/120,60/150]_nであり、添字nはパネル厚さに必要な積層シート数である。繊維含有率は52%である。CFRP作製のキュア条件は、0.3 MPaで120℃、4時間である。

斜め衝突の場合、第一層の3 mm CFRP パネル(以下、第一パネル)の20 mm 下に、厚さ2 mm のA6061 のAl 合金板を第二層(以下、第二パネル)として設置した。それらのパネルの上方、下方、後方に衝突後のプロジェクタイトルおよびエジェクターの観察板を設置した。衝突角度 θ はパネルの水平面からの角度で30°, 45°, 60° および90°とした。

衝突実験には、JAXA の2 段式軽ガス銃を用いた。プロジェクタイトルには、直径7.14 mm(0.219 g)のナイロン66 球を用いた。衝突速度は、2 段式軽ガス銃の負担を考慮し、デブリ速度より若干小さい5 km/s とした。プロジェクタイトルの速度はレーザ検出器を用いて観測した。衝突の瞬間及びその前後の状態を4 μ s 間隔で超高速カメラを用いて全100 コマ記録した。衝突後、パネルと観察板を詳細に観察した。

Table 1 炭素繊維及びエポキシ樹脂の特性

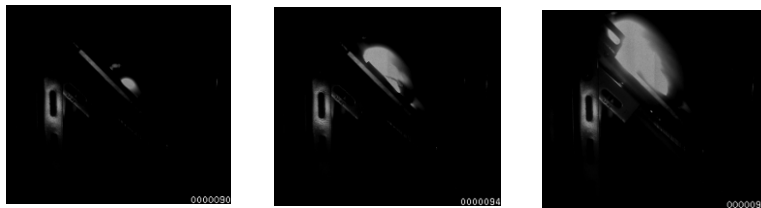
	弾性率 [GPa]	引張り強度 [GPa]	繊維直径 [μ m]	密度 [g/cm^3]
炭素繊維 T700S	230	4.900	7	1.80
エポキシ樹脂	3.39	0.142	—	1.27

3. 結果と考察

3.1 斜め衝突における現象

これまでの実験で、一方向配向の炭素繊維シートを交差積層した CFRP パネルでは、衝突角度が20° 以下では貫通が起こらなかった。しかし破壊が繊維に平行に進み、著しい層間剥離が見られた[4]。

今回の実験では、平織りのシートを積層した CFRP パネルを用いた。Fig.1 に45°で衝突した瞬間と、その4 μ s 後、および8 μ s 後の写真を示す。パネル上の白い部分はプロジェクタイトルの衝突によって生じたプラズマであり、時間とともに広がっている。また、プロジェクタイトルは反跳することなく、第一パネル表面に沿って移動している。Fig.1(c)には、第一パネルの下方垂直方向にエジェクターが認められるが、第二パネルには孔が観察されなかった。



(a) 衝突の瞬間 (b) 衝突の4 μ s 後 (c) 衝突の8 μ s 後
Fig.1 衝突角45° で衝突後のプロジェクタイトルの進行方向



Fig.2 プロジェクタイトル進行方向 (パネル後方) 観察板

プロジェクタイトルがパネル面に沿って進むことは、Fig.2 に示すパネル後方の観察板からも確認される。この写真では第一パネル及び第二パネル共に取り除いてある。観察板上の第一層パネルの延長方向に多くのピットが観察される。すなわち、プロジェクタイトル及びエジェクターとともに、CFRP パネルで反跳することなく CFRP パネル表面に沿って移動したことを示している。衝突角度が30° および60° の場合も同様の結果が得られた。

Fig.3 は、60° 衝突の場合の第一パネル及び第二パネルの表面を示す。Fig.3(a)に示す第一パネルは貫通孔が生じている。一方、Fig.3 (b)に示す第二層には、広い範囲に衝突痕が観察されるが、貫通孔は見られない。



(a) 第一パネル (CFRP Cross ply, 3mm) (b)第二パネル: (6061Al, 2 mm)
Fig.3 衝突角度60°の場合のパネル表面



a)最前部 (b)中間部 (c)最後部
Fig.4 衝突角度90°の場合のパネルの損傷。
(厚さ20 mmの平織り積層 CFRP)

以上に対し、衝突角度が90° の場合はパネルの損傷が著しい。Fig.4 にその結果を示す。20 mm 厚さのパネルは9 層に剥離した。パネルの最前部は、Fig.4(a)に示すように50 mm 角のおよそ2/3 が欠損している。中間部ではFig.4(b)

に示すように、直径約 15 mmの孔が開いた。最後部では Fig.4(c)に示すように、孔の直径は中間部と同程度である。プロジェクトイルは 20 mm のパネルを貫通し、パネルが 2 次元的擬似等方的であるので貫通孔の形状は円形である。

以上の結果より、斜め衝突においては、垂直衝突よりも $1/4 \{(3+2) \text{ mm}/20 \text{ mm}\}$ 以下の薄いパネルで十分であることが明らかとなった。

3.2 衝突点における現象

パネルは、衝突点においてくぼみを生ずる。くぼんだ部分は直ちに元の位置まで戻ろうとする。その戻る速度はパネルの音速に依存する。CFRP の繊維方向の音速は約 8,900 m/s、繊維直角方向の音速は繊維方向の 1/2 以下と見積もられる。したがって、パネルが元の位置に戻った時にはプロジェクトイルは次の位置に移動しているため、Fig.5 に示すようにパネル表面で反跳することなく面に平行に移動することになる。

第一パネルは衝突点においてプロジェクトイルにより直接に著しい損傷を受け、内部に行くに従い損傷は減少する。一方、衝突によって生じた衝撃波は半球面状にパネル面に垂直に伝わる。パネルの裏側は自由表面になっているために、拘束のない衝突点の垂直裏面で衝撃波により大きく損傷する。

第一パネルの裏面より生じたエジェクターは第二パネルに大きく広がっており、その分散したエネルギーは第二パネルにより受け止めることができる。

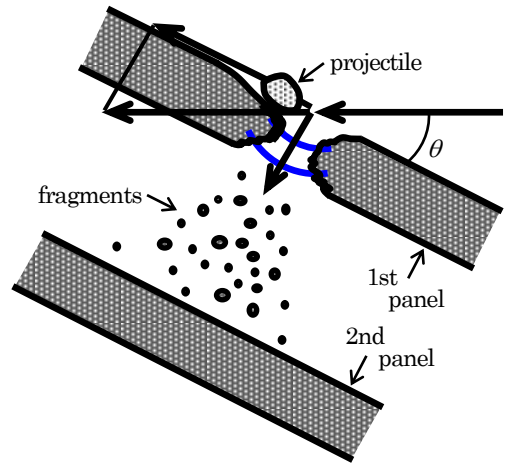
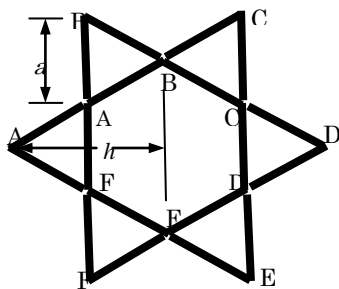


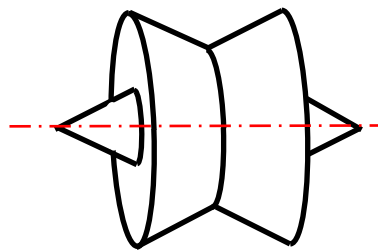
Fig.5 衝突点における現象

3.3 斜め衝突の応用

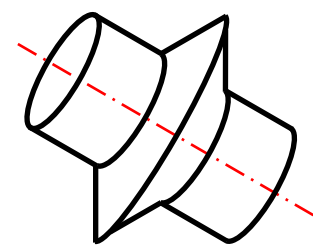
上述の実験結果、60°の角度で衝突した場合、プロジェクトイルはパネルを貫通することなく、衝突後はパネル面に沿って移動することが確認された。そこで、Fig.6(a)に示すような形態にパネルを配置し、図の六角形部分(A, B, C, D, E, F)に装置を配置すれば、どのような方向から来たデブリに対しても防護できることになる。すなわち、デブリが 60°以下で衝突する場合、デブリは第一パネルを貫通することなく、パネル表面を滑って外部に排出される。また 60°以上で衝突する場合、デブリは第一パネルを貫通するが、第二パネルには 60°以下で衝突するので第二パネルの表面を滑って外部に排出される。3次元方向から来るデブリに対しては、Fig.6 の形状を(b)または(c)の回転体とすることで対応できる。これらのうち、Fig.6(b)の方が、Fig.6(c)よりもパネル面積が小さい。



(a) 想定される回転体の回転軸



(b) A - D 軸の周囲の回転体



(c) A' - D' 軸周囲の回転体

Fig.6 2次元防護板から3次元防護板への拡大

ここで、Fig.6(b)の機器収納部の体積に対するパネル面積を見積もる。この回転体は Fig.6(a)において、A を頂点とし CE を底面の直径とする円錐と、頂点を D とし BF を底面の直径とする円錐の組み合わせである。

三角形の AA'および他の三角形の辺が全て a とすると、2つの円錐の全表面積(S)は、

$$S = 2 \times (7.07 a^2 + 14.14 a^2) = 42.41 a^2 \quad \text{よって} \quad a = (S/42.41)^{1/2}$$

六角形の内側の体積は円錐台 ABE'F' (V₂)の 2 倍である。すなわち、

$$V = 2 \times V_2 = 3.17 a^3 \quad \text{よって} \quad a = (V/3.17)^{1/3}$$

以上より、防護パネルの全表面積を体積の関数として表せば、次のとおりとなる。

$$S = 42.41 a^2 = 42.41 \times \{(V/3.17)^{1/3}\}^2 = 19.64 \times V^{2/3}$$

以上の結果を、ロケットに搭載するために最も想定される円筒形と比較してみる。
Fig.7に示すように、円筒形の直径と長さを“ a ”とする。円筒形の体積 (V_c)は、

$$V_c = (\pi a^2/4) \times a = \pi a^3/4 = 0.79 a^3, \text{ よって } a = (V_c/0.79)^{1/3}$$

円筒の表面積 S_c は、

$$S_c = 2 \times \pi a^2/4 + \pi a^2 = 6 \pi a^2/4 = 4.71 a^2$$

したがって、表面積を機器収容部分の体積に対する関数として表すと、

$$S_c = 4.71 a^2 = 4.71 \times \{(V_c/0.79)^{1/3}\}^2 = 5.54 V_c^{2/3}$$

同体積の機器を囲む場合、斜め衝突の必要パネル面積は円筒形の場合の 3.55 (=19.64/5.54)倍となる。実際に、上記の結果で明らかのように、斜め衝突では垂直衝突に場合の 1/4 {(3+2) mm/20 mm}以下のパネル厚さですむ。したがって、斜め衝突防護板は、軽量化に大きく寄与しうる。Whipple シールドは2枚の板で構成される。この場合は、単板の防護板よりも合計厚さは小さくなる。本研究で提案する防護板は Whipple シールドと同様に2枚のパネルで構成されるが、斜め衝突をさせることにより、Whipple シールドより薄くすることができる。

また、Fig.9(b) の 3-D 防護板は全方向に対して 7 km/s のデブリを想定している。しかし、SSPS も仮に 7 km/s の速度で飛翔しているとすると、後方からのデブリの SSPS に対する相対速度は 0 km/s となるのに対し、前方からのデブリは 14 km/s となる。したがって、実際の防護板では前方を厚くし、後方を薄くするなどの厚さ分布を考慮することにより費用対効果が大きくなると考えられる。

結言

斜め衝突による SSPS の防護について検討した。3 mm 厚さの CFRP パネルをターゲットとして用いた。アルミニウム合金板を CFRP 板の下に配置した。プロジェクティルには直径 7.14 mm のナイロン 66 を用いた。そのプロジェクティルは2段式軽ガス銃で 5 km/s で、パネルに対して 60°で衝突させた。プロジェクティルは第一層の CFRP 板に貫通孔を生じたが、衝突後は CFRP 板の表面に沿って進んだ。貫通孔はプロジェクティルの直接破壊ではなく、衝突によって生じた衝撃波による。エジェクターは第二層のパネルを貫通しなかった。垂直衝突の場合は、20 mm 厚さの CFRP 板を貫通した。これらの結果から、斜め衝突は SSPS の機器の防護に有用であることが確認された。

謝辞

著者らは、実験にあたり工学院大学の上山潤氏、九州工業大学の赤星保浩氏、JAXA の長谷川直氏、小野瀬直美氏、並びに東出真澄氏にご協力いただいたことを感謝します。また、本実験は、ISAS/JAXA の宇宙プラズマ研究室のご協力によって実施されたことを感謝します。本実験の一部は、(財)航空宇宙技術財団 (JAST) の資金援助によって実施されたことを感謝します。

参考文献

- [1] Dennis L. Orphal and Charles E. Anderson, Jr., Target Damage from highly oblique hypervelocity impacts of steel spheres against thin laminated targets, *International Journal of impact engineering*, 26, 2001, 567-578
- [2] M.Lee ; Hypervelocity Impact Into Oblique Ceramic/Metal Composite Systems; *International Journal of Impact Engineering*, 29, 2003,417-424
- [3] Makoto Tanaka, Yoko Moritaka, Yasuhiro Akahoshi, Ryuta Nakamura, Akira Yamori and Susumu Sasaki, Development of a light weight space debris shield using high strength fibres, *International journal of Impact Engineering*, 26, 2001, 761-772
- [4] Ichiro Shiota, Hitoshi Kohri, Atsushi Yumoto, Masahiko Kato, Koji Tanaka, Susumu Sasaki, CFRP Panel for Protection from Space Debris by Oblique Collision, *Materials Science and Technology*, 2011, Vol.48, No.3, pp122-128

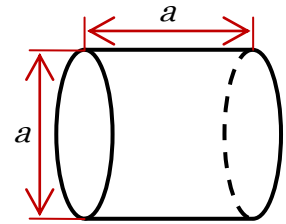


Fig.7 円筒の各部寸法