

液体を用いたスペースデブリシールドの CFRP 構成の検討

高橋秀明^[1] 柴田邦也^[1] 新井和吉^[1] 長谷川直^[2]

[1]法政大学 [2]ISAS/JAXA

1. 緒論

人類の宇宙開拓の進展と共に、軌道上には人工衛星から欠落したボルトや塗料、使用済みの人工衛星などのスペースデブリが増加しており、その周回速度は約 7.8km/s と非常に高速度なために、宇宙構造物と衝突した場合は多大な損害を及ぼす危険性がある¹⁾。現在、国際宇宙ステーション(ISS)にはスペースデブリ衝突の防御用シールドとして、主にホイップルシールドとスタッフィングホイップルシールドが設置されている。ホイップルシールドの基本構造は、アルミニウム(AI)合金の宇宙構造物外壁(与圧壁)の外側に、約 110mm~120mm の間隔をあけて AI 合金のバンパがあり、衝突デブリをこのバンパで粉碎し、その後方の空間で拡散させて与圧壁へ与えるダメージを軽減するものである。また、スタッフィングホイップルシールドは、ホイップルシールドのバンパと与圧壁の間に多層強化材を組み込むことで防御性能を向上させたものである²⁾。このシールドにより約 1cm 以下のデブリは防御可能である。また、約 10cm 以上のデブリについては地上からの観測が可能のため軌道を予測し回避することができる。しかし、大きさ約 1cm~10cm のデブリは地上観測が困難な上に、現在のシールドではデブリ衝突から宇宙構造物を保護できない可能性がある。さらに、将来の宇宙構造物では、シールドの性能向上に加え、打ち上げによる輸送経費の削減のために軽量化が課題となっている。

著者らはこれまで、シールドの軽量化を目的に高分子材料やシリコーンゲルを用い、その防御性能の検討を行ってきた³⁾。さらに、スペースデブリシールドの防御性能を向上させ、かつ軽量化を図ったシールドを開発することを目的に、シールド構成のうち、与圧壁を 2 重層構造とし、その層間に液体層を入れ、液体層の慣性抵抗によるデブリ破片の減速効果を利用したシールドを試作し、衝突実験および数値シミュレーションによって、その性能評価を行ってきた⁴⁾。

本研究では、液体層を用いたシールドにおいて、軽量化を目的に、AI 合金の一部あるいは全てを、AI 合金よりも軽量で高比強度の炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に変更したシールドを試作し、その防御性能に及ぼす CFRP 構成の影響について検討を行った。

2. 試作したシールド

2.1 液体層を用いたシールド⁴⁾

液体層を用いたシールドにおいて、2 重与圧壁層の層間に

注入する液体層には、ISS 内に搭載されている飲料水などの液体や使用済みの廃液などを想定している。そのため、打ち上げの際には液体の重量はシールドの重量分としては付加されず、さらには、貯液槽としても兼用できるため、船内のスペースを拡大することも可能となる。

既存のホイップルシールドと液体を利用したシールドの概略図を Fig.1 に示す。Type A はホイップルシールドを模擬したもので、前面を A6061-T6 ($t=1\text{mm}$)のバンパとし、114mm の空間をあけて、後面に与圧壁を模擬した A2024-T3 ($t=5\text{mm}$)を設置した。Type A は Type A のバンパの後方 93mm の位置に、もう一枚の与圧壁(A6061-T6, $t=1\text{mm}$)を付加して 2 重構造と圧壁とし、その与圧壁間の 20mm の空間に液体層を設置したものである。本研究での液体には市水を使用した。重力下での実験を行うため、水にある程度の形状保持能力を持たせるよう、吸水性ポリマー(アクリル酸重合体部分ナトリウム塩架橋物)に混合し、ゲル状としたものを使用した。水と吸水性ポリマーの重量比は、100:1 とした。

2.2 液体および CFRP を用いたシールド

シールドの軽量化を図るため、上記の Type A, Type A において、AI 合金の一部あるいは全てを、AI 合金よりも軽量で高比強度の炭素繊維強化エポキシ樹脂複合材料(CFRP)に変更したシールドを試作した。各々のシールドの構成を Table 1 に示す。CFRP の板厚は AI 合金と同一とし、Type B および Type B, C は、Type A のバンパ、前面与圧壁のみおよびバンパと前面与圧壁の両者をそれぞれ CFRP に変更し、後面与圧壁は AI 合金のままとしたものである。また、Type C および Type D は、Type A および Type A の AI 合金をすべて CFRP に変更したものである。さらに、Type E は Type C の後面与圧壁部分を CFRP($t=1\text{mm}$)と AI 合金($t=4\text{mm}$)を密着させた構造のシールドとした。これは、スペースデブリが衝突後に、シールドを交換する必要があり、後面与圧壁の AI 合金以外の交換を容易にしたものである。

本研究に使用した CFRP(T700S/#2500)は、密度が 1555kg/m^3 であり、一般的な AI 合金の密度約 2700kg/m^3 よりも約 42% 軽量である。CFRP の積層構成は直交異方積層として、バンパおよび前面与圧壁($t=1\text{mm}$)は $[(0/90)_2]_s$ の 8ply、後面与圧壁($t=5\text{mm}$)は $[(90/(0/90))_{10}]_s$ の 42ply とした。各シールドの面密度を Table 1 に示す。Type A の面密度は 16.55kg/m^2 であるのに対し、Type B および C は 15.41kg/m^2 および 9.36kg/m^2 である。また Type A~E の面密度はそれぞれ 19.25kg/m^2 , 18.11kg/m^2 , 16.97kg/m^2 , 10.92kg/m^2 , 15.76kg/m^2

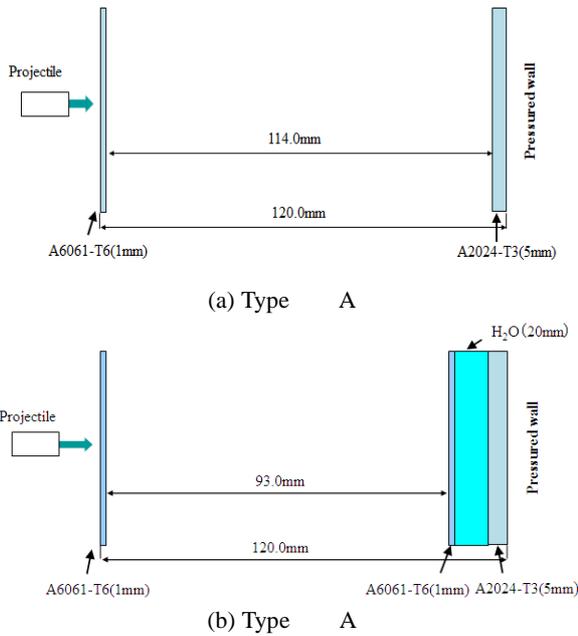


Fig.1 Schematic diagrams of space debris shield

Table 1 Constitution of space debris shield

Shield	Bumper (1mm)	Front pressurized wall (1mm)	Water (20mm)	Rear pressurized wall (5mm)	Areal density (kg m ⁻²)
Type I - A	A6061-T6	—	—	A2024-T3	16.55
Type I - B	CFRP	—	—	A2024-T3	15.41
Type I - C	CFRP	—	—	CFRP	9.36
Type II - A	A6061-T6	A6061-T6	Water	A2024-T3	19.25
Type II - B	A6061-T6	CFRP	Water	A2024-T3	18.11
Type II - C	CFRP	CFRP	Water	A2024-T3	16.97
Type II - D	CFRP	CFRP	Water	CFRP	10.92
Type II - E	CFRP	CFRP	Water	CFRP(1mm)+ A2024-T3(4mm)	15.76

である。なお、液体層は、与圧壁内の液体を移送することを想定して、面密度には加算していない。

3. 高速衝突実験

スペースデブリ衝突を模擬した超高速衝突実験には、ISAS/JAXA 所有の二段式軽ガスガンを用い、飛翔体は円柱型 PC(質量 0.64g, 直径 7.0mm, 長さ 14.0mm, スカート部直径 7.15mm)とした。衝突速度範囲は 5.3 ~ 5.9km/s, 衝突角度は 90°の垂直衝突とした。シールドの寸法は、400mm × 400mm の正方形とし、四隅を支柱にボルトで固定した。なお、最前面のバンパの損傷は飛翔体衝突点近傍のみとなり、バンパにある程度の大きさがあれば、後方の与圧壁等の損傷に与える影響に変化はないことから、一部の実験ではバンパ寸法を 160mm × 160mm とした。

4. 結果および考察

Table 2 と Fig.2 に、飛翔体の衝突速度と実験後の各シールドの構成素材の損傷形態、損傷寸法および写真を示す。液体層のない Type A ~ C は与圧壁が貫通する結果となった。一方、液体層を入れた Type A ~ E は与圧壁が非貫通となり、これにより液体層を挿入することで、耐デブリ防御性能

が大幅に向上している。これは、バンパを貫通し発生したデブリクラウドが、前面と圧壁を貫通して液体層に侵入した際、液体の慣性抵抗によりデブリクラウドの速度が減少したためと考えられる。損傷形態の特徴的なこととして、Type A ~ E の前面と圧壁は衝突方向と反対方向に花卉状に変形していた。これはデブリクラウドが液体層に進入した際、発生した熱エネルギーによって一部の液体に気化が生じ体積が膨張し、その際のエネルギーは後面と圧壁よりも薄い前面と圧壁に作用するため、飛翔体衝突方向と反対方向に損傷が生じたものと推測される。

バンパを Al 合金で構成した Type A と CFRP で構成した Type B の後面と圧壁を比較すると、Type B の後面と圧壁の方が、デブリクラウドの破片の衝突による損傷が少ない。これは、バンパが Al 合金の場合には、密度の高い Al 合金のデブリクラウドが発生するのに対し、CFRP の場合には、CFRP を構成しているマトリックス樹脂が、衝突の際に熱エネルギーによってガス化し、後面と圧壁には、主に微細で Al 合金よりも密度が小さい炭素繊維が衝突したためと推測される。

ついで、Al 合金と液体層で構成した Type A は後面と圧壁に 3.8mm のへこみがあったのに対し、バンパと前面と圧壁を CFRP で構成した Type C では後面と圧壁のへこみが 0.9mm と小さくなっており、全て CFRP で構成した Type D では後面と圧壁の CFRP に外見上の損傷は見られなかった。以上のことから、シールドの材料を Al 合金から CFRP にすることで、デブリ防御性能を向上させ、且つ軽量化されることが確認された。しかし、CFRP は、外部からの衝撃を受けた場合、外観には損傷が確認できなくても、層間剥離などの内部損傷が発生する可能性がある。そこで、三次元超音波探傷試験装置(Matrixeye, 楨東芝)を用いて Type C と Type D の CFRP 後面と圧壁の内部損傷の測定を行った。その結果を Fig.3 に示す。Type C の後面と圧壁(a)は貫通している中央部を中心に縦約 143mm × 横約 125mm の範囲で内部損傷が見られた。Type D の後面と圧壁(b)では、炭素繊維の繊維方向(直交方向)に縦に最大約 295mm, 横に最大約 330mm の内部損傷が広がっており、外観上の損傷は見られなかったものの内部には広い範囲で損傷していることが確認された。液体層があり貫通していない Type D の方が損傷面積が大きいのは、与圧壁間にある液体層の影響によって衝撃が広い範囲に分散されたためと考えられ

Table 2 Results of hyper-velocity impact test

Shield	Impact velocity (km/s)	Bumper (mm)	Front pressurized wall (mm)	Space or water	Rear pressurized wall (mm)	Rear pressurized wall Penetrate / No penetrate
Type I - A	5.38	A6061-T6 Hole(φ 11.2)	—	—	A2024-T3 Hole(φ 16.3)	Penetrate
Type I - B	5.40	CFRP Hole(sq9.8x9.9)	—	—	A2024-T3 Hole(φ 19.0)	Penetrate
Type I - C	5.42	CFRP Hole(sq8.7x9.2)	—	—	CFRP Hole(φ 20.3)	Penetrate
Type II - A	5.45	A6061-T6 Hole(φ 11.3)	A6061-T6 Hole(φ 164.6)	Water	A2024-T3 Dent(H3.8)	No penetrate
Type II - B	5.84	A6061-T6 Hole(φ 11.6)	CFRP Hole(φ 43.0)	Water	A2024-T3 Dent(H1.2)	No penetrate
Type II - C	5.55	CFRP Hole(sq9.6x8.6)	CFRP Hole(φ 37.4)	Water	A2024-T3 Dent(H0.9)	No penetrate
Type II - D	5.52	CFRP Hole(sq9.1x9.6)	CFRP Hole(φ 35.9)	Water	CFRP No damage	No penetrate
Type II - E	5.35	CFRP Hole(sq9.4x9.1)	CFRP Hole(φ 33.0)	Water	CFRP Surface damage A2024-T3 Dent (H0.7) (sq70x50)	No penetrate

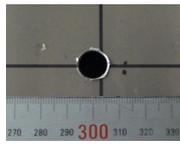
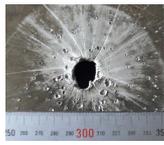
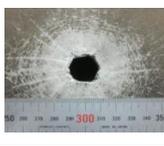
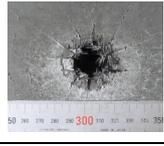
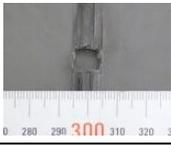
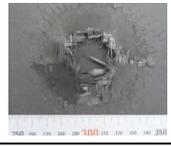
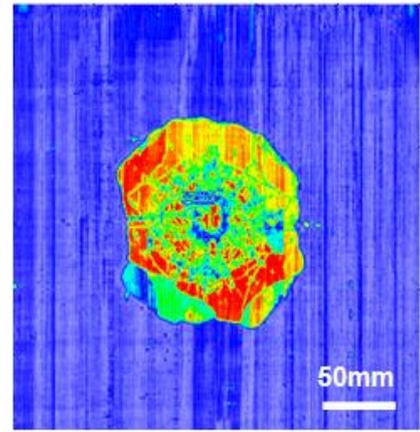
Type	Bumper	Front pressured wall	Rear pressured wall
A		-	
B		-	
C		-	
A			
B			
C			
D			
E			
	Bumper	Front pressured wall	Rear pressured wall
			

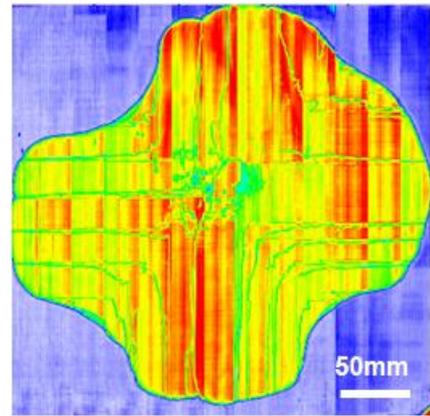
Fig.2 Photograph of each shield

る。しかしながら、後面と圧壁は圧力容器であり、損傷が発生した場合、使用期間中にその補修や交換は困難なため、後面と圧壁としては CFRP よりも Al 合金の方が望ましいと思われる。

さらに、Type E の後面と圧壁の CFRP(1mm)は中央部を中心に縦に約 70mm、横に約 50mm の範囲の表面にクレタ等の損傷跡が見られたが、裏面に損傷などは無く非貫通であった。その後方に設置した Al 合金の後面と圧壁(4mm)の表面には 0.7mm のへこみがあったが、クレタ等の損傷は見ら



(a) Type C



(b) Type D

Fig.3 Result of ultrasonic test of pressured wall (CFRP)

れなかった。これらのことから、CFRPの後面と圧壁まではデブリクラウドを防御できており、デブリの衝突によってシールドが損傷しても、Al合金の後面と圧壁よりも前方のシールドを交換することによって修復が可能である。

5. 結論

液体を用いたシールドにおいて、構成材のAl合金の一部あるいは全てをCFRPに変更したシールドを試作し、その防御性能について検討を行った結果、防御性能が向上し、かつ軽量化を行うことが可能であることがわかった。しかし、後面と圧壁にCFRPを用いた場合には、層間剥離等の内部損傷が見られ、後面と圧壁にはAl合金の方が望ましいことがわかった。

参考文献

- 1)八坂哲雄, 宇宙のゴミ問題 - スペースデブリ -, (1997), p.58, 裳華房
- 2)茂原正道, 宇宙を活かす, (1999), pp.114-115, オーム社出版局
- 3)小山修人, 新井和吉, 長谷川直: 高分子材料を積層した試作デブリシールドの耐衝撃性能, 平成 18 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, pp.105-108, 2007
- 4)高橋秀明, 新井和吉, 小川靖博, 長谷川直: 液体を利用したスペースデブリシールドの開発, 平成 21 年度スペース・プラズマ研究会, 3(CD-ROM), 2010