

## 第3 2回衛星設計コンテスト

### ジュニア概要書（3 ページ以内）

応募区分 ジュニアの部

#### 1. 作品情報・応募者情報

作品名（20文字以内） * 作品内容が推測しやすいような名称を付けてください。（略称は不可） ダイラタンシー流体を用いた防御壁の形成 <small>りゅうたい ぼうぎょへき けいせい</small>
副題（自由記入） 宇宙デブリによる人工衛星の破損を軽減し宇宙デブリ回収を効率化する新たな構造 <small>うちゅう じんこうえいせい はそん けいげん うちゅう かいしゅう こうりつか あら こうぞう</small>
学校名 大分県立大分舞鶴高等学校 理数科 <small>おおいたけんりつ おおいたまいづる こうとうがっこう りすうか</small>

#### 2. ミッションの概要（プレスリリース等で使用するので、200 字程度でわかりやすく表現して下さい。）

本ミッションは、人工衛星の外壁にハニカム機構とダイラタンシー流体を用いることによって、衛星の防御性能を改善し、将来的な有人宇宙活動の安全性の向上を目指すものである。具体的には、強い衝撃を加えると硬化するダイラタンシー流体の特性を最も発揮できる液体と粒子の割合や、ダイラタンシー流体の特性が宇宙空間でも正常に機能するのかを検討し、ダイラタンシー流体を使用したシールドの構造を提案する。

#### 3. 目的と意義（目的・重要性・技術的意義等）

##### (a) 目的（今回考えたアイデアを何に利用するか等）

近年、宇宙開発の分野は大きな発展を見せ、世界中で注目を集めている。月居住計画・火星移住計画など人類の宇宙進出という面においても単なる夢物語ではなくなってきた。よってこれから有人宇宙機の需要が今までとは比べ物にならないほど大きくなると考えられる。有人宇宙機と聞いて誰しも思い浮かべるのは ISS（国際宇宙ステーション）だろう。しかし、国際的な研究の場として長年活躍してきた ISS だが、主に老朽化が原因で 2030 年ごろに破棄され、後継の宇宙機に変わる予定になっている。

本ミッションの目的は次世代の ISS に搭載するための、ダイラタンシー流体を用いたバンパーの構造を提案し、有人宇宙機の安全性を向上させることである。

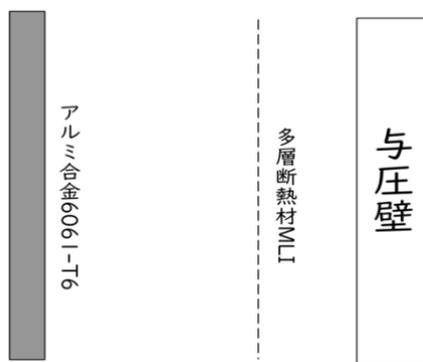
##### (b) 重要性・技術的意義等 (ex: 宇宙空間で利用する理由、他にない技術など)

ISS は、与圧壁の外側にアルミ合金を配置してデブリの衝突による与圧壁の損傷を防ぐホイップルバンパーを用いている。この構造は 1cm 以下のデブリの衝突ならほとんど損傷がないが、1cm 以上のデブリの衝突では機体に穴が空いてしまう。10cm 以上のデブリについては位置を捕捉することで衝突を回避しているが、現在宇宙空間においてデブリが加速度的に増加する「ケスラーシンドローム」という現象が問題となっていて、このままデブリが増加し続け、将来的にデブリが人工衛星の軌道上を埋め尽くすほどの数になるとたとえデブリを観測・監視できたとしてもその全てを回避することは不可能になると考えられる。そして、ISS の後継の宇宙機のデブリ対策が現在のホイップルバンパーのままでは宇宙機・宇宙飛行士が甚大な被害を被る可能性が高まるだろう。それに対処するには単純に考えれば構体の金属壁を厚くするしかないのだが、それでは質量面・金銭面でのデメリットが大きくなる。

また、従来のホイップルバンパーでもある程度の防御性能の高さを示すのだが、デブリが衝突した際、一定期間その破損部を放置することになるため、一時的にその防御性能に不安を残すこととなる。例えば、予期せぬデブリ衝突により生じた損傷部付近にさらに他のデブリが衝突する可能性は極めて低いが、その損傷部が修復されない限り、損傷部周辺の脆性が改善されないことは確かである。その対策として人工衛星の外壁にダイラタンシー流体を用いることで、デブリの衝突により外壁に損傷ができたとしても、ダイラタンシー流体の性能には目立った悪影響をもたらさないため、衛星の防御力は大きく低

下しないと考えられる。さらに、ダイラタンシー流体の特性によって、バンパー内部に入射した宇宙デブリをその場に留めることができるため、デブリの確実な捕捉を可能にすることができる。

これらをふまえて、私たちはデブリに対する防御力の向上、デブリの受動的な回収を目標としてダイラタンシー流体を用いた新たなバンパー構造を提案し実現することは、さらなる宇宙開発の発展のために重要なことであると考えます。



ISSのホイップルバンパー

#### 4. アイデアの概要

※ミッション全体の構成・ミッション機器の形状・質量・機能・運用軌道など、図を使用するなどして分かりやすく説明して下さい。

人工衛星のバンパー部分にダイラタンシー流体を用いるにあたって、ダイラタンシー流体が宇宙環境でも正常にその特性を発揮できるのか、ダイラタンシー流体を使用することの防御面における優位性、またダイラタンシー流体を人工衛星のバンパー部分に使用したときの質量面の影響を検証する。

##### 〈Ⅰ〉ダイラタンシー流体の水と片栗粉の最適な比率の検討

水と片栗粉の質量比が異なる三種類のダイラタンシー流体を使用し、それらのダイラタンシー流体にガウス加速器で直径2cmの鉄球を打ち込み、衝撃を数値化し、ダイラタンシーの性質を最も強力に示す水と片栗粉の比率を検討する。詳細は補足説明書参照。

##### 〈Ⅱ〉真空空間内でのダイラタンシー流体の観察

〈Ⅰ〉の検証で用意した三種類のダイラタンシー流体をベルト駆動油回転真空ポンプに入れ、流体がどのように反応するのかを観察する。詳細は補足説明書参照。

##### 〈Ⅲ〉ハニカム構造にダイラタンシー流体を加えたときの防御力の検証

下記の2種類の壁を作成する。

- ① 発泡スチロールのみ
- ② 発泡スチロールとダイラタンシー流体のみ（ダイラタンシー流体は検証〈Ⅰ〉で最も防御力が高かった比率のものを使用する）

それぞれにモデルガンでBB弾を衝突させ、衝突限界速度（V50）を検証する。

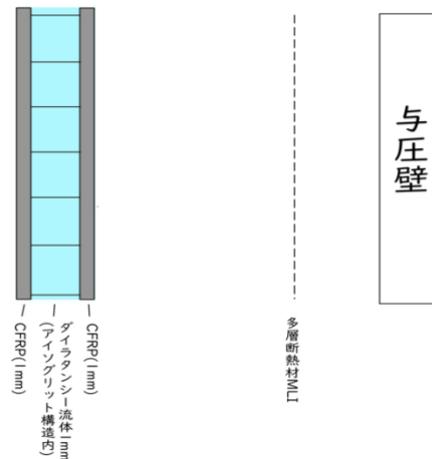
詳細は補足説明書参照。

〈Ⅰ〉～〈Ⅲ〉の検証結果をふまえて、私たちは以下のようなアイデアを提案する。

- ・宇宙空間での低圧沸騰を防ぐために、ダイラタンシー流体の材料に不揮発性の液体を使用する。
- ・流体を使うことによるバンパー部分の質量の増加を防ぐために、アルミ合金の代替としてCFRPを使用する。
- ・バンパー構造は外側からCFRP1mm、ダイラタンシー1mm、CFRP1mm、MLI、与圧壁。
- ・衝突により外壁に穴が生じた際、液体の宇宙空間への放出を最小限にとどめるために、ダイラタンシーの層はアイソグリット構造の三角形の中にダイラタンシー流体を入れる。

・液体を留めるために本来1枚のシールドを2枚にする必要があるが、下の表に示すように私たちが考案した構造なら大幅な質量増加につながることはない。

ISSのデブリバンパー	Al合金6061-T6(1.27mm)	—	—	合計
面密度(g/cm <sup>2</sup> )	0.3429	—	—	0.3429
提案するバンパー	CFRP(1mm)	ダイラタンシー流体(1mm)	CFRP(1mm)	合計
面密度(g/cm <sup>2</sup> )	0.15	0.1174	0.15	0.4174



## 5. 得られる成果

※宇宙で利用することにより、どのような効果があるかなど。

### ①ダイラタンシー流体とハニカム機構の使用

人工衛星のバンパー部分にダイラタンシー流体とハニカム機構の積層多重構造を用いることで、宇宙デブリなどが飛び交う過酷な宇宙環境での物体の衝突に対する防御力かつその持続性の向上、デブリの受動的な捕捉、または回収が可能となる。

### ②ダイラタンシー流体の流動性

ダイラタンシー流体は強い剪断刺激を加えていない時は液体の状態であるから、流動性を持っており、一定の形を持たない。現在、球状の人工衛星などが開発されているが、この流動性を利用して、さまざまな形状の人工衛星にダイラタンシー流体を応用すれば、何度も構造を設計する必要がなくなり、作成コストの削減しつつ幅広い種類の人工衛星の耐久性の課題を解消することができ、衛星開発の幅を広げることが可能となる。

### ③ 月面住居の実現

将来実現するかもしれない月旅行のために、月面に住居を建設するという構想があるが、月面には高頻度で隕石が落下するため、隕石の衝突に耐えることができる耐久性を持った住居を建設する必要がある。しかし、月まで頑丈な建築資材を持っていくのはコスト面、時間面で見ても現実的ではない。そこで、もし実際に宇宙空間でダイラタンシー流体が特性を発揮するならば、月面の砂「レゴリス」と月に存在する水を使用して現地でダイラタンシー流体を作ることができる可能性があり、月面に隕石などの衝突に耐える住宅を建てるという構想を実現することができる。

## 6. 主張したい独創性または社会的な効果

※「ここは新しいアイデアである」という部分や、このアイデアによって世の中のここに役立つなど、特に主張したい箇所。

過酷な環境の宇宙空間で、宇宙デブリの衝突に対処するための構造に剛体を多用するのではなく敢えて流体を用いることで、デブリ回収を確実なものとするという点で独創性を主張したい。

以上

## ダイラタンシー流体を用いた人工衛星の防御力向上

大久保花梨 船瀬蒼良 増野峰柁 渡邊倅成

【要約】本研究の目的は、ISSに代わる次世代の有人宇宙機のバンパー構造にダイラタンシー流体を用いることによって衛星の防御性能の向上を目指すことである。最も防御力の高いダイラタンシー流体を調べるために、水と片栗粉の比率が異なるダイラタンシー流体を作成しロードセルを用いて衝撃実験を行った結果、水：片栗粉=1：1.55のダイラタンシー流体が最も防御性能が高いことがわかった。また、ダイラタンシー流体の宇宙での有用性を検証するために流体を真空空間で放置し様子を観察した結果、液体の膨張・沸騰が確認された。さらに、弾道限界速度V50を検出する実験ではダイラタンシーを使った構造はダイラタンシーを使わなかった構造より防御性能が高いことがわかった。これらの調査で得られた知見をもとに、宇宙空間で十分に特性を発揮できるダイラタンシー流体の材料そしてバンパー構造の詳細を検討しダイラタンシー流体を用いた有人宇宙機のバンパー構造を提案する。

### I. はじめに

現在、宇宙開発が大きな発展を見せ有人宇宙開発の技術もかなり進歩している。そんな中、デブリが加速度的に増加し続ける「ケスラーシンドローム」という現象が問題になっており、宇宙開発においてデブリ対策・デブリ回収の重要性は増す一方である。しかし、現在のISS（国際宇宙ステーション）のデブリバンパーでは1cm以上のサイズのデブリの衝突による損傷は避けられない。将来的にもデブリが人工衛星の軌道上を埋め尽くすほど増加し全てを回避することが不可能になった時、これから数多く開発されるであろうISS以外の有人宇宙機のデブリ対策が今のデブリバンパーのままでは宇宙機や宇宙飛行士の安全に不安を残すことになってしまう。そこで、遅い剪断刺激に対しては液体のように振る舞い、より速い剪断刺激に対しては固体のような抵抗力を発揮する性質を持つダイラタンシー流体をデブリバンパーに使用すれば、防御性能の向上を実現することができるのではないかと考え、実験・検討を行った。

### II. 研究方法

私たちは、人工衛星のバンパー部分にダイラタンシー流体を用いるにあたって、最も強い防御性能を発揮するダイラタンシー流体の比率、宇宙空間におけるダイラタンシー流体の有用性、ダイラタンシー流体を用いた壁の防御力を検証するために以下のような実験を行った。

#### 【実験1】

ダイラタンシー流体の特性を最も強く発揮する水と片栗粉の比率を調査する。

(方法)

① 水と片栗粉の比率が異なる6種類のダイラタンシー流体を用

意した。

	1:1.4	1:1.45	1:1.5	1:1.55	1:1.60	1:1.65
片栗粉	140g	145g	150g	155g	160g	165g
水	100g	100g	100g	100g	100g	100g

- ② 3Dプリンターで作成した円筒型の容器の中にロードセルを置き、その上にダイラタンシー流体を流し込む。いずれの液体でも床から水面までが3.5cmになるように注ぎ込んだ。この時、ロードセルが液体で濡れて故障しないようにロードセルの上にビニール袋を被せ、型から液体が漏れないように周りをグルーガンで固めた。
- ③ ダイラタンシー流体の水面から真上に100cmの位置からガウス加速器を使って質量60gの鉄球を打ち出した。この時、落下地点がロードセルの計測部分にピンポイントで一致するように打ち出し位置から落下地点を透明の筒でつなげた。
- ④ 衝撃の値と衝突直前の速度を検出し、単位速度あたりの衝撃の値(N/m/s)を求めた。

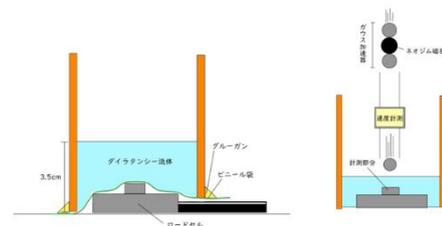


図1 実験装置の図



図2 実験装置

(結果)

実験の結果、一度の衝突につき3つの値が検出されたため、1回目の値、2回目の値、3回目の値でそれぞれ別々に記録をとり分析を行った。その結果、1回目2回目3回目いずれの値でも水と片栗粉の比率が1:1.55の時単位速度あたりの衝撃の値が最も小さいことがわかった。



図3 実験結果

(考察)

結果より、最も防御性能を強く発揮するのは水1に対する片栗粉1.55のダイラタンシー流体であることが示唆された。実験で検出された3回の値は、1回目が水面に当たった瞬間、2回目が流体の中、3回目がロードセルに直接当たった瞬間の値であると考えられる。

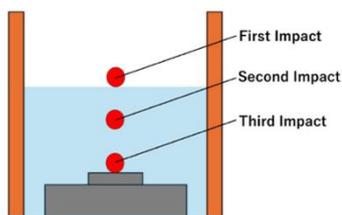


図4 3回の衝撃

また、グラフについて1:1.6の比率から衝撃の値が上昇しているのは、ダイラタンシー流体の状態が完全な固体に近い状態になっていて衝撃波がコルクの栓を抜くように剪断打ち抜きの伝わったため、1:1.5より右側でグラフの値が高くなっているのはダイラタンシー流体が硬化せずに液体に近い状態だったので鉄球の勢いがそのまま伝わったためだと考えられる。よって1:1.55は液体と固体の状態をバランスよく保ち、衝突の衝撃を分散させることができる比率であると考えられる。

### 【実験2】

真空空間でのダイラタンシー流体の有用性を検証する。

(方法)

実験1で用いた1:1.55のダイラタンシー流体を減圧装置(バルト

駆動油回転真空ポンプ)に入れ、どのような反応が起こるのか観察する。

(結果)ダイラタンシー流体を真空状態の空間に入れると膨張・沸騰することが確認された。



図5 流体が減圧沸騰する様子

(考察)

ダイラタンシー流体が膨張したのは、材料の水が減圧沸騰したからであると考えられる。よって、宇宙で使用するダイラタンシー流体を作成するには不揮発性の液体を使用する必要があることがわかった。その例として、イオン液体や油やグリセリンなどが挙げられるがイオン液体の場合電気伝導率が高いので帯電する危険性も考えられるため今後詳しく調査していきたい。

### 【実験3】

ダイラタンシー流体を使用した壁の弾道限界速度V50を求める。

(方法)

- ① 発泡スチロールだけの壁(厚さ3cm)、発泡スチロールとダイラタンシー流体を組み合わせた壁(厚さ2.5cm)を用意した。

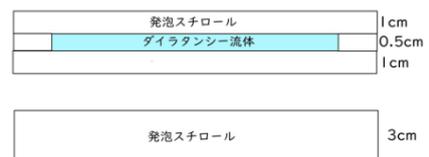


図6 比較する2つの模擬防御壁

- ② モデルガンでBB弾を撃ち出し、速度を変えながら貫通しかなかったか記録する。
- ③ おおよその弾道限界速度の目測をアップアンドダウン法によって定める。
- ④ 得られた記録をもとに最小二乗法を使ってV50(100回撃って50回貫通する速度)を求めた。



図7 実験装置

(結果)

V50はダイラタンシー流体入りのシールドが57.41576m/s、ダイラタンシー流体なしのシールドが56.327535m/sとなり、厚さが薄いダイラタンシー入りのシールドの方が防御力が高くなった。

V50に着目するとダイラタンシー流体入りのバンパー構造の方が防御性能が高くなることがわかった。

ダイラタンシーなし			ダイラタンシーあり		
区間	V	確率	区間	V	貫通確率
50-52	51	0	49-51	50	0
52-54	53	0	51-53	52	25
54-56	55	37.5	53-55	54	40
56-58	57	60	55-57	56	33.33333
58-60	59	80	57-59	58	50
60-62	61	100	61-63	62	66.66667
64-66	65	100	63-65	64	100
66-68	67	100	65-67	66	100

図8 実験結果の度数分布表

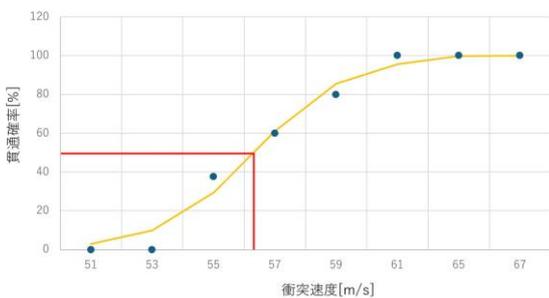


図9 発泡スチロールの貫通確率

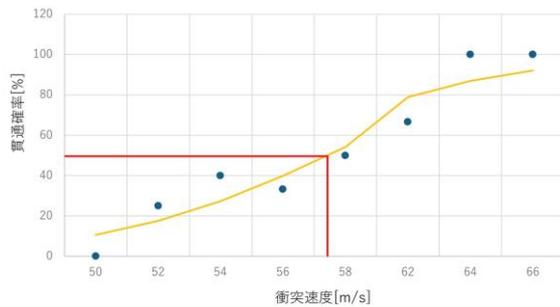


図10 ダイラタンシー流体と組み合わせた壁の貫通確率

(考察)

結果より、ダイラタンシー流体を用いることでシールドの防御性能が向上すると考えられる。

### Ⅲ. まとめ

実験よりダイラタンシー流体を宇宙開発に活かすことができる可能性が示唆された。しかし、ダイラタンシー流体を使用すると質量が大幅に増加してしまうことが考えられる。そのため、宇宙空間で使用するにあたって衛星の質量増加を防ぐための材料、具体的な構造を検討する必要がある。そこで、現在ISSのデブリバンパーに使用されているアルミ合金6061-T6に代わり、より軽量でかつ丈夫なCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を使用する。具体的にはバンパ

ー外側からCFRP1mm、ダイラタンシー流体1mm、CFRP1mm、多層断熱材MLI、与圧壁、という構造である。ダイラタンシー流体で質量が増加することに加え、液体を留めておくために本来1層のみであるシールドを2層に増やす必要があるが、下の表に示すように、私たちが考案するCFRPを用いた構造なら、質量増加の影響をほとんど受けることはない。

ISSのデブリバンパー	Al合金6061-T6(1.27mm)	-	-	合計
面密度(g/cm <sup>2</sup> )	0.3429	-	-	0.3429
提案するバンパー	CFRP(1mm)	ダイラタンシー流体(1mm)	CFRP(1mm)	合計
面密度(g/cm <sup>2</sup> )	0.15	0.1174	0.15	0.4174

図11 各バンパーの面密度比較

以上の研究より私たちが提案する次世代の有人宇宙機のデブリバン

パーの具体的な構造・材料は以下の通りである。

- ・液体：粉体=1：1.55のダイラタンシー流体
- ・ダイラタンシー流体の作成には不揮発性の液体を使用
- ・アルミ合金の代わりにCFRP(炭素繊維強化プラスチック)を使用
- ・機体損傷による液体の流出を最小限に抑えるためにダイラタンシー流体はアイソグリット構造の中に入れる

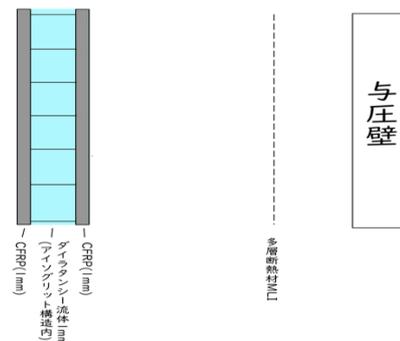


図12 提案するデブリバンパー

### Ⅵ. 引用参考文献

- 1) 金井典子(2012). 人工衛星のスペースデブリ対策. REAJ誌, vol134, p178-185.
- 2) 可知朋之, 熊崎隆斗, 森悠太郎. 異常粘性現象の強度測定とその応用. 学校間総合ネット
- 3) 宇宙機をゴミの超高速衝突から防護する. engineering-eye. 2024年10月28日閲覧. URL: [https://www.engineering-eye.com/rpt/column/2016/0219\\_spacedebris.html](https://www.engineering-eye.com/rpt/column/2016/0219_spacedebris.html)
- 4) 高橋秀明, 柴田邦也, 新井和吉, 長谷川直(2010). 液体を用いたスペースデブリシールドのCFRR構成の検討. スペースプラズマ研究会・講演集(web), p2

以上