

氏 名 長岡 洋一

学位(専攻分野) 博士(工学)

学位記番号 総研大甲第 1581 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 物理科学研究科 宇宙科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 宇宙機の薄型パネル構造への超高速衝突における
電気的現象の研究

論文審査委員 主 査 准教授 船木 一幸
准教授 田中 孝治
准教授 阿部 琢美
専任准教授 田中 真 東海大学
研究員 東出 真澄
宇宙航空研究開発機構

論文内容の要旨

宇宙機へのスペースデブリやマイクロメテオロイドの超高速衝突の研究分野では、これまで主に構造的損傷に関する研究が行われてきた。例えば、宇宙機の防護に関連した、被衝突体の貫通限界と貫通孔サイズ、クレータの形状とサイズ、衝突で生じるイジェクタの放出形態、デブリシールドに関する研究などである。構造的破壊の他に、衝突プラズマの発生と伝播、高周波帯の電磁波放射、プラズマ発生に伴う被衝突体の電位変動現象が生じ、宇宙機に電氣的影響を及ぼす可能性があるため、超高速衝突による電氣的現象の研究も非常に重要である。

多くの場合、宇宙機表面の最大の面積を占める部分は太陽電池パネルであり、一般的な地球周回の人衛星では、太陽電池パネルは全表面積の30~40%を占めている。特に、今後の宇宙開発では、輸送コストを低減させる目的で、薄膜太陽電池パネル、平面アンテナ、インフレータブル構造など、軽量で大型の薄板構造（典型的には厚さ1mm以下程度）が本格的に使用されるようになると考えられている。また、将来の超大型宇宙建造物の典型例であるキロメートル級の太陽発電衛星でも、主要部分である集光部、発電部、送電部は全て薄板構造と想定されている。スペースデブリの衝突確率は宇宙機の表面積が広がるほど高くなるため、このような大型の建造物では、スペースデブリやマイクロメテオロイドの衝突は不可避のものとしてその影響を評価する必要がある。近い将来では、宇宙機の大電力化に伴う重量軽減の目的で、mm程度からそれ以下の厚さの薄膜太陽電池の使用が主流となることが想定されるため、本研究では、ターゲットとして板厚mm以下の薄板に対する貫通型衝突で生じる電氣的現象を研究の対象とした。

本研究は、薄板パネルへの貫通型超高速衝突実験を行うことにより、衝突プラズマの空間的な伝播と衝突部における電位変動の特性を明らかにし、その物理モデルを構築することを目的として実施した。これらのモデル化により、超高速衝突現象が宇宙機に及ぼす電氣的影響によるリスクを衛星の設計段階で評価することが可能な工学的知見を得ることが可能と考えられる。そのための実験として、単一元素で構成される厚さ0.1mm~3.0mmの金属薄板に対して直径3.2mmのアルミニウムの金属球を秒速6km程度で衝突させる実験を行った。衝突部を中心に配置したダブルプローブアレイによりプラズマの空間的な分布を計測した。また、プラズマ伝播に関連する現象である高温ガスからの発光現象（衝突発光雲）を高速度カメラで撮影した。これらの結果を比較し、プラズマ伝播の特性を明らかにした。プラズマ密度を求める際には、衝突発光の3波長分光計測から求めた温度を用いた。一方、被衝突物体で生じる電位変動は、ターゲットをグランドから絶縁させた状態にし、ターゲットとグランド間で発生する電圧を計測した。本研究で得られた衝突プラズマと電位変動に関する主な実験結果は、次の3つである。

(1) プラズマ密度の伝播角度依存性：ターゲット面から30度の角度範囲にプラズマ密度が最大となる角度が存在した。特に、影響評価で重要となる衝突ターゲットの沿面方向に伝播するプラズマの密度は、実験を行った材料の場合では衝突位置から距離10cmの位置で

1013~1015 cm⁻³ 程度である。

(2) プラズマ伝播速度：プローブで計測したプラズマ伝播速度と高速度カメラで撮影された画像から求めた発光雲の伝播速度は、おおよそ同じ程度であった。このため、両者の運動はほぼ等しいものと考えられる。

(3) 衝突部における電位変動：衝突部が持つ静電容量が200pF程度の場合、発生する電位変動の最大値は+7V~+12V程度であった。また、電位が最大値になるのに要した時間は、100ns程度であった。

薄板ターゲットに対して球形プロジェクタイトルが衝突する場合における、電氣的現象の物理モデルを構築した。以下にそれぞれの結果を示す。

(1) 衝突プラズマの伝播モデル

・実験室実験では実験チャンバーの残留ガスの影響を受けるため、伝播距離のマイナス4~5乗程度で減衰するが、ドリフトマクスウェル分布を仮定した本モデルでは、プラズマ密度は距離のマイナス3乗で減少することが示された。

・プラズマの放出が幾何学的に伝播可能な空間に限られると仮定すると、伝播可能な範囲は時間と共に変化する。実験結果では、プラズマ密度はある角度で最大となったが、モデルからも伝播量が最大となる角度が存在することが定性的に示された。

(2) 電位変動現象の物理モデル

・電子とイオンの移動度の差から一部電子の離脱により正イオンが過剰になることで衝突部が正に帯電すると考えられる。そこで、新たにプラズマ粒子のエネルギー分布がマクスウェル分布であると仮定し、衝突部の電位変動が生じるというモデルを立てた。モデルに基づいて計算した結果と計測された電圧を比較し、本モデルにより電位変動が説明であることが示された。

これらの実験結果と物理モデルから、宇宙機に対する超高速衝突で生じる電氣的影響が示唆された。

(1) 衝突プラズマの影響

本実験で計測されたプラズマ密度に伝播距離依存性を仮定すると、発電電圧100V以上の場合における放電開始の閾値（プラズマ密度1010cm⁻³）からパネル面上1~2mの範囲に影響が及ぶと推定される。比較的衝突確率が高い直径1mmのデブリ衝突で生じるプラズマ密度が本実験で得られたプラズマ密度よりも1桁程度低いと仮定した場合でも、放電リスクが生じる領域は1m程度のスケールとなる。

(2) 電位変動現象の影響

太陽電池パネルあるいは宇宙機表面の電気伝導部に衝突が発生した場合は、衝突部の対地容量に応じた電位が発生し、その電位変動は伝導ラインを通じて、衛星内部に伝播していく可能性がある。本実験で観測された10Vレベルの電圧変動はプラズマ総量1015個、対地容量 数百pFの場合であるが、本実験と同レベルの電圧変動が大きくは減衰せず、内部に伝播した場合は、ロジック回路等に悪影響を及ぼす可能性がある。

博士論文の審査結果の要旨

本論文は、宇宙機へのスペースデブリ衝突の影響について、薄型構造物への衝突で生じる電氣的現象に関する、実験とモデルによる研究成果の報告である。研究対象とする、超高速衝突においては、クレーター形成のような機械力学的な破壊現象の他に、衝突により、ターゲット材料及び飛翔体の一部が気化及び電離することによりプラズマが発生する。発生したプラズマは、伝搬過程において、宇宙機の導体が宇宙空間に露出している部位と相互作用を行ない、電氣的影響を与える可能性がある。特に、大電力化の傾向にある宇宙機の太陽電池パドルは、衝突により発生したプラズマをトリガーとして損傷破壊を生ずる可能性がある。また、プラズマ発生時のエネルギーの高い電子の離脱により、高速度での電位変動を誘起する可能性がある。このようなデブリの宇宙機との超高速衝突により発生する電氣的現象は、今後、宇宙機の大電力化においては高電圧化、インテリジェント化におけるロジック回路の誤動作防止等のために、設計指針として考慮すべき重要な対象である。しかし、従来の超高速衝突における電氣的現象に関する研究では、プラズマ生成、伝搬及び誘起する現象に関して、詳細な研究がなされていない。特に、宇宙機の軽量化のために重要な薄板構造に関しては、ほとんど研究事例がない。

本論文には、デブリ衝突として低高度軌道における衝突確率の観点から考慮すべきパラメーターである数km/sで飛翔する数mmサイズの飛翔体との衝突に関して、2段式軽ガス銃を使用し、ターゲットとして薄板材料を用い、サブ μ 秒で発生するプラズマを数十 μ 秒に渡り、プラズマ計測用ダブルプローブ、高速度カメラ、分光計測により精密な観測を行なった結果が記載されている。ダブルプローブと光学的計測を組み合わせた μ 秒オーダーの時間分解能での計測は独創的手法であり、それにより、プラズマの伝搬形態、電子温度、電子密度変化が明らかにされている。また、超高速衝突により、金属ターゲットの電位が、数mV以上で変動することを実験的に見出しており、実験室での定量的研究は他に例がない。

次に、薄板構造におけるプラズマの発生と伝播に関して、新しいモデルを構築し、実験結果の説明を行うとともに、薄板構造では、ターゲット表面を電離層プラズマに比べて高い密度のプラズマが伝播し、その密度は衝突点からの距離の逆3乗則で減少することを新たに見出した。また、プラズマ生成時の電子離脱にともなう電位変動に関するモデルを新たに構築し、実験結果の説明を行った。

最後に、上記のプラズマ生成と伝搬、電位変動に関して、宇宙機に及ぼす影響を定量的に評価し、電氣的側面からのデブリ衝突対策のための設計ガイドライン策定における有用な方向性を示している。

このように本論文の内容は、超高速衝突における電氣的現象に関して、プラズマの発生・伝搬を詳細に検討し、新たなモデル構築により宇宙機への影響評価を行ったものである。本論文は、高電圧化を必要とする宇宙機の設計において必要となる数多くの知見を与えるものであり、宇宙工学分野での貢献は顕著なものと言える。

本論文を構成する主な内容は、査読付き論文2件、国際会議1件にすでに発表されており、博士論文としての独創性を有し、かつ十分な学術水準に達していると認められる。また、上記掲載論文の筆頭著者であることから、出願者の本研究についての主体的な取り組みが認められる。

以上の点より、博士(工学)の学位を授与するにふさわしいものであると全員一致で判断した。