

|            |   |
|------------|---|
|            | ぬま た だい じゅ  |
| 氏 名        | 沼 田 大 樹   |
| 授 与 学 位    | 博士 (工学)   |
| 学位授与年月日    | 平成21年3月25日  |
| 学位授与の根拠法規  | 学位規則第4条第1項  |
| 研究科, 専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻  |
| 学位論文題目     | Experimental Study on Hypervelocity Impact Phenomena<br>at Low Temperatures in Ballistic Range<br>(バリスティックレンジを用いた極低温環境下での高速衝突現象<br>に関する実験的研究) |
| 指 導 教 員    | 東北大学教授 小濱 泰昭  |
| 論文審査委員     | 主査 東北大学教授 小濱 泰昭 東北大学教授 浅井 圭介<br>東北大学教授 福西 祐 東北大学准教授 孫 明宇  |

## 論 文 内 容 要 旨

スペースデブリの高速衝突は宇宙構造物や宇宙往還機に深刻な損傷を与え、宇宙探査の安全性と信頼性の障害となる。地球低周回軌道上において、直径 100 mm 以上のスペースデブリはカタログ化され、軌道が特定されている。しかしながら、直径が 100 mm 以下のスペースデブリは地上からの観測は一般に困難であり、未だカタログ化されていない。スペースデブリの平均速度は 10 km/s 以上であり、これらが持つ運動エネルギーは非常に大きい。そのため、微小デブリから宇宙構造物を防護する手段は宇宙開発において極めて重要な検討課題である。スペースデブリバンパーシールドの設置による宇宙構造物の防護は最も信頼できる方法であり、二段式軽ガス銃を始めとした多くの地上設備による高速衝突実験でその性能が検証され、また、シールドの更なる高性能化が推し進められている。しかしながら、それら地上実験の大半は常温環境下において行われており、シールドが実際に曝される苛酷な熱環境下での性能評価はほとんど試みられることが無かった。このような極限熱環境下では、シールド材料の材料物性値・機械的特性は常温のものとは異なるため、それらが高速衝突破壊挙動に与える影響は検討すべき重要課題である。

本論文は、極低温に冷却したアルミニウム合金、マグネシウム合金および炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の高速衝突破壊現象を実験的・数値的に解明した研究成果を取りまとめたもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は結論である。

第 2 章では、極低温環境下におけるアルミニウム合金の高速衝突破壊特性を明らかにするため、バンパーシールド模擬板を独自開発した液体窒素回流型低温試験槽 (図 1) を用いて極低温に冷却し、高速衝突試験を実施して室温環境下での結果と比較した。試験板厚と衝突飛行体直径の比率を示す形状比を 0.252 とし、高速飛行体射出装置として東北大学流体科学研究所に設置された大型二段式軽ガス銃 (図 2) を用いた。高速度ビデオカメラを用いて衝突速度 1.0 km/s から 3.7 km/s の範囲においてバンパーシールド模擬板として AL5052-H34 を用いた

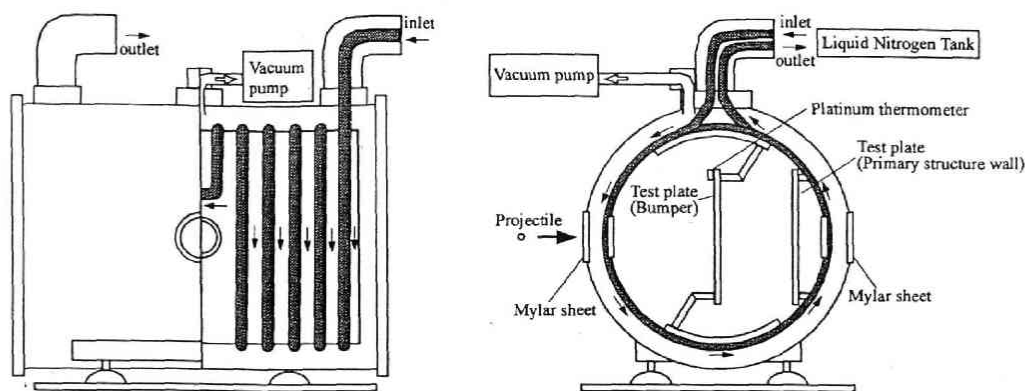


Fig.1 Schematic drawing of liquid nitrogen flow-type cryostat

場合の高速衝突破壊過程を記録した。デブリ雲先頭部の飛散速度と飛行体衝突速度は線形関係を示し、試験速度範囲内では試験環境温度はデブリ雲先頭部速度に影響を与えなかった (図3)。デブリ雲形状に与える試験環境温度の影響は限られ、光学可視化を用いた観察では明瞭な構造的変化は認められなかった。衝突速度 1.0 km/s から 6.5 km/s の範囲において、バンパーシールド模擬板上に形成された貫通孔の直径は試験環境温度の影響を受け、同一衝突速度条件下では試験環境温度の低下に伴い貫通孔直径が小さくなることを認めた (図4)。バンパーシールド模擬板後方に設置した主壁上の損傷パターンは

試験環境温度の低下に伴い中心部に集中した。特に粉砕された衝突飛行体の破片に起因する主壁中心部の損傷群は低温環境下においてより狭い範囲内に集中する傾向が明らかであり (図5)、二次デブリの拡散範囲に環境温度が影響を与えることを明瞭に示した。これはバンパーシールドを用いた宇宙建造物の防護を行う際に、環境温度が防護性能に与える影響を事前に考慮すべきことを示す重要な知見である。

また、バンパーシールド模擬板に形成される貫通孔断面の破壊形状について、試験温度の影響を認めた。特に AL5052-H34 において、貫通孔断面に楔状亀裂構造の生じる衝突速度がより低速側に存在した。この結果は、貫通孔直径が試験板温度の影響を受けるという結果と併せ、貫通孔直径や貫通孔断面の破壊

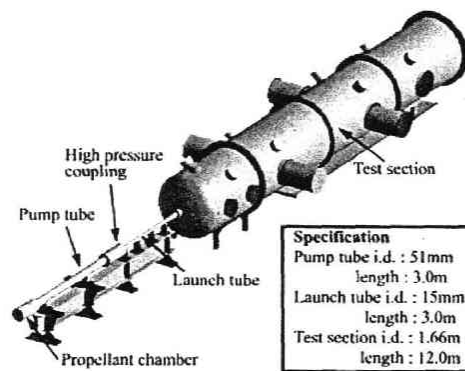


Fig.2 Two-stage light gas gun at IFS, Tohoku university

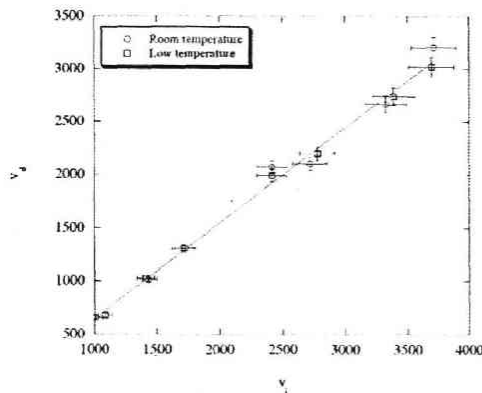


Fig.3 Relationship between averaged debris tip speed and impact speed before the first impact on the main wall

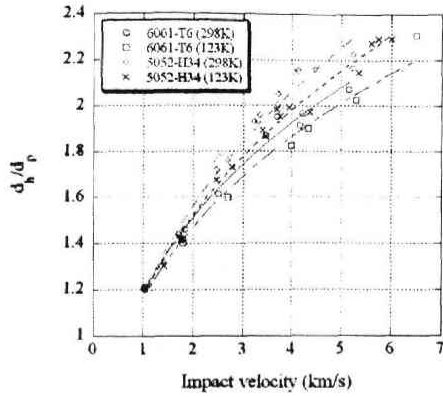


Fig.4 Relationship between normalized hole diameter and impact velocity

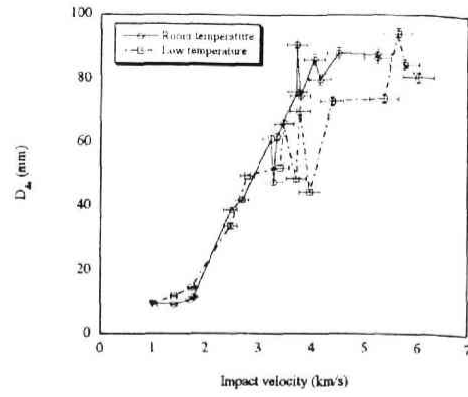


Fig.5 Relationship between the damage on the main wall installed 100 mm from the AL5052-H34 bumper shield and impact velocity

形状等によりデブリ環境を推定する既存のモデルにデブリ衝突時の環境温度の影響をも考慮すべきことを示した重要な知見である。また、降伏応力項を含む貫通孔直径を予測する実験式を提案した。

第3章では、衝撃解析ソフトウェア AUTODYN を用いて数値解析を行い、貫通孔直径に与える材料物性値の影響を検討した。試験板の初期内部エネルギーと降伏応力が貫通孔直径に特に影響を与え、降伏応力の増加と初期内部エネルギーの低下が貫通孔直径の減少を招くことを示した。また、低温環境下における貫通孔直径の減少を数値的に模擬することに成功した。

第4章では、アルミニウム合金以外の材料について極低温環境下における高速衝突実験を行い、それらの極低温高速衝突破壊挙動を明らかにした。面密度を  $5.4 \text{ kg/m}^2$  としたマグネシウム合金 ZK60A-T5 に対して高速衝突

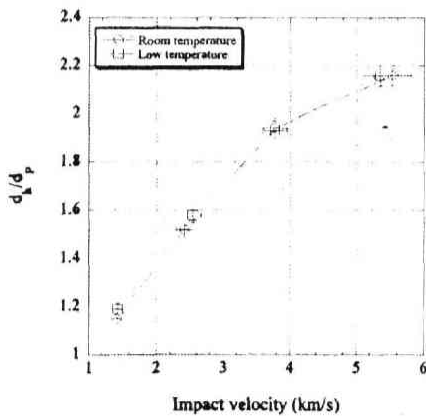


Fig.6 Relationship between the normalized perforation hole diameter on CFRP plate and impact velocity

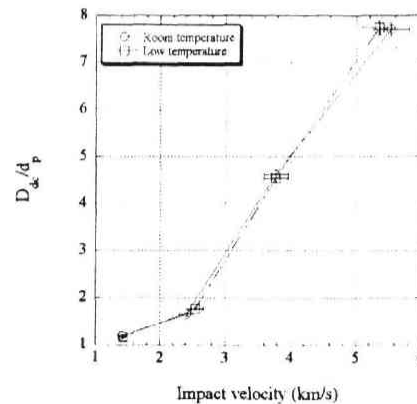


Fig.7 Relationship between the damage on the main wall installed 100 mm from the CFRP plate and impact velocity

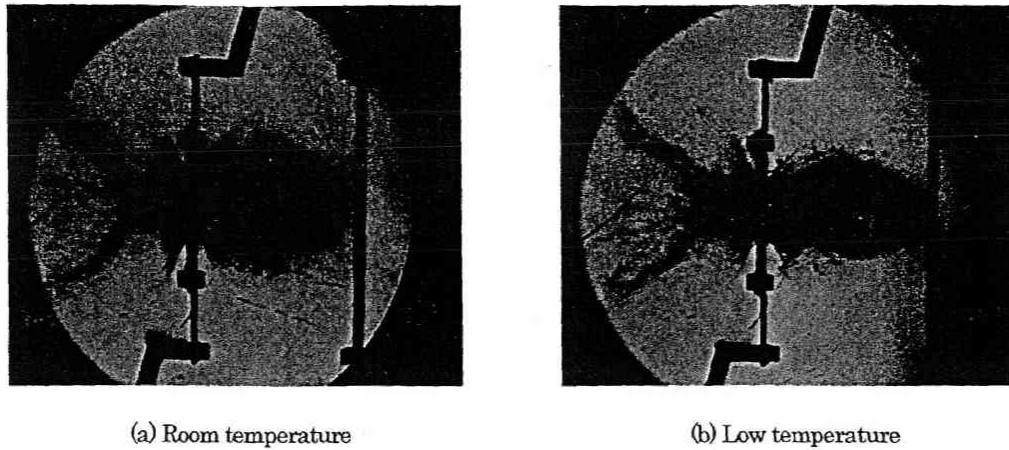


Fig.8 Shadowgraph images of CFRP debris cloud: just before it impinging on the main structure wall: (a) 294 K at 1.41 km/s; and (b) 150 K at 1.43 km/s

実験を行い、同様の面密度を持つアルミニウム合金板の試験結果と比較した。AL5052-H34、AL6061-T6 及び ZK60A-T5 に対して直径 7.94 mm のアルミニウム球を衝突させた場合の弾道限界性能を主壁模擬板の貫通/非貫通の状態と比較し、同一面密度ではマグネシウム合金がアルミニウム合金の場合と比較して幅広い衝突速度で高い防護性能を持つことを明らかにした。この結果はマグネシウム合金のバンパーシールド材料としての利用の可能性を明確に示した重要な知見であり、より軽量で対デブリ防護性能の高いバンパーシールドの開発等、宇宙開発におけるマグネシウム合金の利活用を促進する重要な成果である。また、本論文の条件内では、試験環境温度は弾道限界性能に明瞭な影響を与えなかった。極低温に冷却した CFRP 板に対し衝突速度範囲 1.4 km/s から 5.4 km/s の条件下で高速衝突実験を行い、常温環境下での試験結果と比較した。CFRP 上に形成された貫通孔の直径及び主壁上に形成された損傷の直径に与える試験環境温度の影響は明瞭には認められなかった (図 6、図 7)。高速度ビデオカメラを用いた影写真法によるデブリ雲の可視化の結果、衝突速度 1.4 km/s でデブリ雲の構造に試験環境温度の影響を認めた (図 8)。しかしながら、衝突速度 2.4 km/s 以上ではデブリ雲の形状に及ぼす試験環境温度の影響は明瞭には認められなかった。

第 5 章は結論である。

以上要約すると、本論文は、極低温環境下におけるアルミニウム合金、マグネシウム合金及び CFRP の高速衝突破壊現象を、実験的および数値的に明らかにした。

# 論文審査結果の要旨

スペースデブリ衝突による宇宙構造物や宇宙機の損傷を軽減するために、スペースデブリバンパーシールドの果す役割は大きい。地球周回軌道上の日照面温度は 400K を超え、日陰温度は 120K 近傍まで低下する。このような極限環境下では、バンパーシールド材料の物性、機械的性質は常温のそれとは異なり、高速衝突の破壊挙動も常温とは異なる。そのため、バンパーシールド性能の温度依存性の解明は緊急課題である。極限環境下の実験は常温環境下での場合と異なり環境整備に時間・コストがかかるため、実験実施は容易でなく、研究の飛躍的な進展は期待できない。しかし、宇宙構造物の安全運用を目指し、極限環境下での高速衝突実験は必須であり、緊急なデータベース構築が要請される。本論文は、極限環境下、特に極低温環境下において生じる高速衝突破壊挙動を解明することを目的として、高速衝突破壊挙動の温度依存性に関する研究成果をまとめたものであり、全編 5 章からなる。

第 1 章は緒言であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、独自に設計、開発した液体窒素回流型低温試験槽を用い、過去の研究により温度効果が顕著に見られたアルミニウム合金及び実際にバンパーシールド材として用いられているアルミニウム合金材料に対して高速衝突実験を行い、高速衝突破壊挙動の温度依存性を評価している。バンパーシールド材に形成された貫通孔の断面破壊形態に温度依存性を認め、速度増加に伴い進行する破壊挙動の複雑化が低温の場合はより低速域において生じることを認めている。貫通孔直径の温度特性を定量的に測定している。その結果を基に、貫通孔直径の予測式を新たに提案している。これは実用上重要な成果である。

第 3 章では、アルミニウム合金材料に対して行った高速衝突実験の結果に対して数値解析を行い、衝突破壊と材料特性の関係を調べている。材料の剛性率より降伏応力の影響が著しいことを認めている。これは、バンパーシールド材の選定のために重要な知見であり、バンパーシールド設計に指針を与える有用な成果である。

第 4 章では、マグネシウム合金 ZK60A-T5 及び炭素繊維強化プラスチック(CFRP)に対して極低温環境下において高速衝突実験を行い、アルミニウム合金以外の物質における低温高速衝突現象について議論している。アルミニウム合金、マグネシウム合金共に弾道限界を測定し、同一面密度条件下ではマグネシウム合金の弾道限界性能はアルミニウム合金の性能を上回ることを明らかにしている。また、CFRP 試験板上に形成された貫通孔の直径及び主壁上の損傷面積は、試験板温度の影響を受けていないことを認めている。これらは、バンパーシールドの軽量化を実現するために非常に重要な成果である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、低温高速衝突破壊挙動に関する実験及び計算を行い、バンパーシールドの設計に対して有用な成果を得たものであり、航空宇宙工学および高速衝突安全技術の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。