

## マグネシウム合金の極低温下における高速衝突特性\*

久保田 怜<sup>\*1</sup>, 島本 聡<sup>\*2</sup>, 手塚 還<sup>\*3</sup>  
沼田 大樹<sup>\*4</sup>, 高山 和喜<sup>\*5</sup>High-Velocity Impact Characteristic of Magnesium Alloy  
under Cryogenic TemperatureRyo KUBOTA<sup>\*6</sup>, Akira SHIMAMOTO, Meguru TEZUKA,  
Daiju NUMATA and Kazuyoshi TAKAYAMA<sup>\*6</sup> Graduate School of Engineering, Saitama Institute of Technology,  
1690 Fusaiji, Fukaya-shi, Saitama, 369-0293 Japan

High-velocity impact experiments were conducted on magnesium alloy plates at room and cryogenic temperature, 298 K and 153 K. An aluminum sphere with room temperature impinged at the target plate with its speed ranging from 0.5 to 1.7 km/s in 100 Pa air. The impact process was visualized by shadowgraph, and recorded with the ultra-high speed video camera. Results of the experiment was compared to results which were obtained from previous experiments for a thicker specimen. In addition, it was compared to experimental results from aluminum alloy specimens that our co-investigator presented in the past. As a result, the difference was found on the damage of debris cloud impingement. It was affected by bumper material, plate temperature and impact velocity. It is thought that the bumper performance of the magnesium alloy is better than aluminum alloy, because the damage of magnesium alloy was distributed more shallowly and more widely than that of aluminum alloy.

**Key Words:** Nonferrous Metal, Impact Strength, Brittle Fracture, Cryogenic Temperature, High-Velocity Impact, Magnesium Alloy, Space Debris

## 1. 緒 言

環境保全や省エネルギーの観点から機械・構造物の軽量化に伴い、アルミニウム合金や高分子材料に替わる軽量高強度材料としてマグネシウム合金が用いられるようになった。マグネシウム合金は、実用金属中比重が最も小さく比強度、比剛性に優れており、電磁シールド性、振動吸収性、切削加工性、耐くぼみ性、寸法安定性などの特徴を有し、資源が豊富でリサイクル性に優れている。しかし、活性金属であるため塩素イオン、酸、塩類に対し耐食性が悪く、常温における塑性加工が困難といった使用・製造上難点があり、従来はアルミニウム合金の添加元素として、非構造物への用途が大部分であった。近年、製造方法の開発やコーティング技術の進歩により、航空・宇宙構造物材、自動

車部品およびモバイル機器筐体など構造部材への使用が拡大している<sup>(1)</sup>。

マグネシウム合金を宇宙構造物に用いる場合、高温および極低温環境下で宇宙ゴミ(スペースデブリ)との衝突による耐久性について考慮しなければならない<sup>(2)(3)</sup>。スペースデブリとの衝突は、宇宙構造物に大きな損傷をもたらす、二次災害を引き起すだけでなく人命をも脅かす<sup>(4)(5)</sup>。そこで、スペースデブリとの衝突から宇宙構造物を防護するために、構造壁の外側にSpace Debris Bumper Shieldを設け、構造物の損傷を軽減している。Myers ら<sup>(6)</sup>は、高温環境下で超高速衝突実験により、貫通孔は室温よりも大きく、低速の方が貫通破壊プロセスにおよぼす試験環境温度の影響が顕著であることを明らかにし、Francesconi ら<sup>(7)</sup>は、低温では、貫通孔直径におよぼす試験板温度の影響はみとめられないのに対し、影写真法により撮影したデブリクラウドの外形構造は試験板温度の影響を受けることを明らかにしている。また、Tanaka ら<sup>(8)</sup>は極低温環境下で、主構造壁に生じる損傷の温度依存性について明らかにし、Christiansen ら<sup>(9)</sup>は、バンパー材料としてAZ 31 BがAl 6061-T6よりも優れていることを明らかにしている。しかしこれらの研究では、板厚の影響についての検討はなされていないのが現状で

\* 原稿受付 2009年6月17日。

<sup>\*1</sup> 正員, 埼玉工業大学大学院工学研究科(〒369-0293 深谷市普濟寺1690)。<sup>\*2</sup> 正員, 永年会員, 埼玉工業大学先端科学研究所。<sup>\*3</sup> 埼玉工業大学大学院工学研究科 物質科学工学専攻。<sup>\*4</sup> 正員, 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01)。<sup>\*5</sup> 正員, 名誉員, 東北大学流体科学研究所 衝撃波学際応用研究部門。

E-mail: q7002upo@sit.ac.jp

ある。先に著者らは、板厚 3.0 mm のマグネシウム合金 ZK 60 A-T 5 の極低温環境下における高速衝突実験により、破壊挙動について明らかにした<sup>(10)</sup>。そこで、本研究では板厚 2.0 mm の ZK 60 A-T 5 の極低温環境下での高速衝突実験により破壊挙動におよぼす板厚による影響について検討を行った。

## 2. 実験方法

**2・1 試験片** 本研究に用いた供試材は、マグネシウム合金 ZK 60 A-T 5 (大阪富士工業株式会社製) の展伸材で、試験片、バックプレートの形状・寸法およびスペースデブリを模擬した飛行体の寸法を表 1 に、機械的性質および板厚、密度、面密度を表 2 に、化

学組成を表 3 に示す。本研究では、表 2 に示す ZK 60 A-T 5 の板厚 2.0 mm について調べるとともに、ほぼ同じ面密度を有する ZK 60 A-T 5 ( $t=3.0$  mm) と Al 5052-H 34<sup>(11)</sup> について比較・検討を行った。

**2・2 実験装置** 本研究で用いた実験装置はバリスティックレンジ (二段式軽ガス銃, 東北大学流体研究所 学際衝撃波研究センター) で図 1 に示す。本装置は、火薬室、圧縮管、高圧カップリング部、加速管および試験部によって構成され、飛行体の速度に応じて一段式火薬銃と二段式軽ガス銃との操作モードを切替えて使用することができる。本実験では一段式火薬銃と加速管および試験部の構成で行った。

実験に際し、試験片とバックプレートを図 2 に示す

Table 1 Material and geometry of test components

Item	Material	Shape	Size
Specimen	ZK60A-T5	Plate	110×110×2.0 [mm]
Projectile	Al2017-T4	Sphere	dia. : 7.938 [mm], mass : 0.74 [g]
Back plate	Al2024-T3	Plate	200×200×5.0 [mm]

Table 2 Mechanical and material property of specimens

Material	Tensile Strength [MPa]	Yield Strength [MPa]	Elongation [%]	Density $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Thickness $t$ [mm]	Arial density $\rho \times t$ [g/cm <sup>2</sup> ]
ZK60A-T5	275.5	150.1	15.0	1.78	2.0 3.0	0.356 0.534
Al5052-H34	260	215	10.0	2.68	2.0	0.536

Table 3 Chemical properties of ZK 60 A-T 5 (weight %)

Al	Zn	Mn	Zr	Cu	Ni	Re	Mg
-	4.8 - 6.2	-	0.45 - 0.8	0.03 Max.	0.005 Max.	-	Rem.

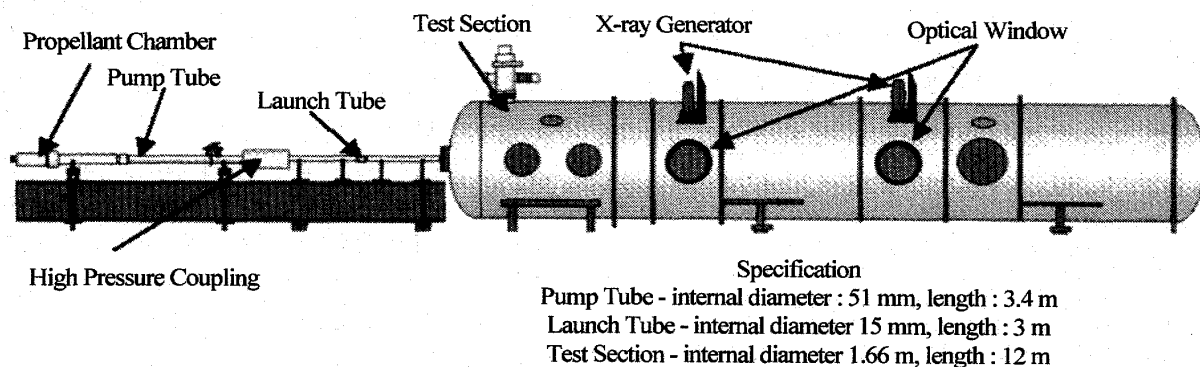


Fig. 1 Schematic diagram of two-stage light gas gun

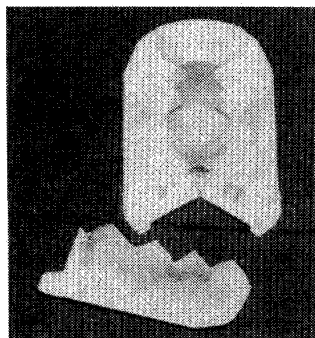


Fig. 2 Projectile and four-piece Sabot

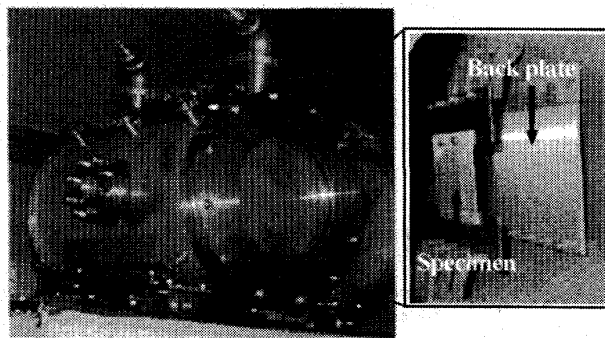


Fig. 3 Cryogenic chamber and installation of specimen

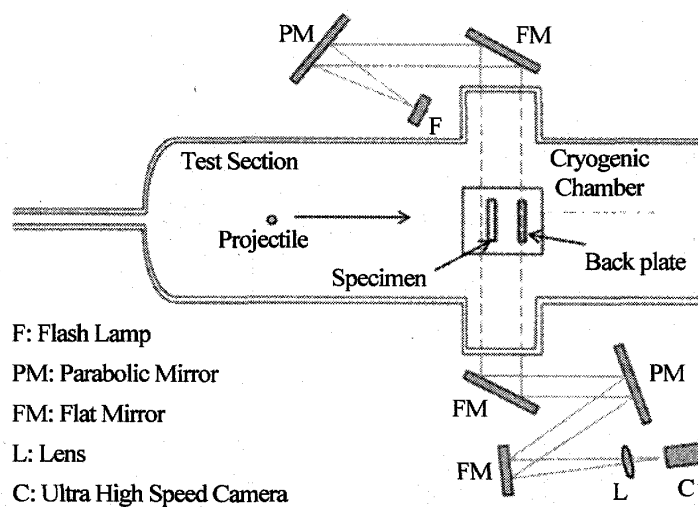


Fig. 4 Shadowgraph optical setup

バリスティックレンジ部冷却槽内の試験部に設置した後に、飛行体を図3に示すポリカーボネート製の4分割型のサボに組み込み、加速管に装填した。ここで試験片とバックプレートの間隔は104 mm、飛行体は球状(表3参照)である。その後、冷却槽内と試験部の環境圧力をそれぞれ100 Pa、40 kPaに調整し、冷却槽内に液体窒素を回流させることにより試験片の冷却を行い、飛行体を発射した。ここで、板厚3.0 mmのZK 60 A-T 5の場合、飛行体の衝突速度( $v_i$ )を0.5, 1.0, 1.7 km/s, Al 5052-H 34の場合は1.0, 1.4, 1.7 km/s, 冷却槽内の試験片温度は298, 153 Kである。また、衝突現象は図4に示す影写真法により可視化し、ウルトラハイスピードカメラ Imacon200 (DRS Hadland 製)により撮影した。

### 3. 実験結果および考察

**3・1 試験片の損傷** 本研究では、飛行体が試験片に衝突した時の破壊挙動を明らかにするために、常温(298 K)と極低温(153 K)環境下で高速衝突実験を行った。その結果を図5~7に示す。ここで図5は、

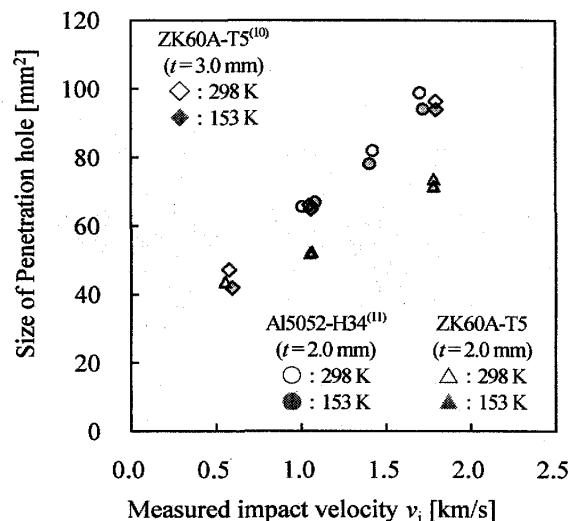
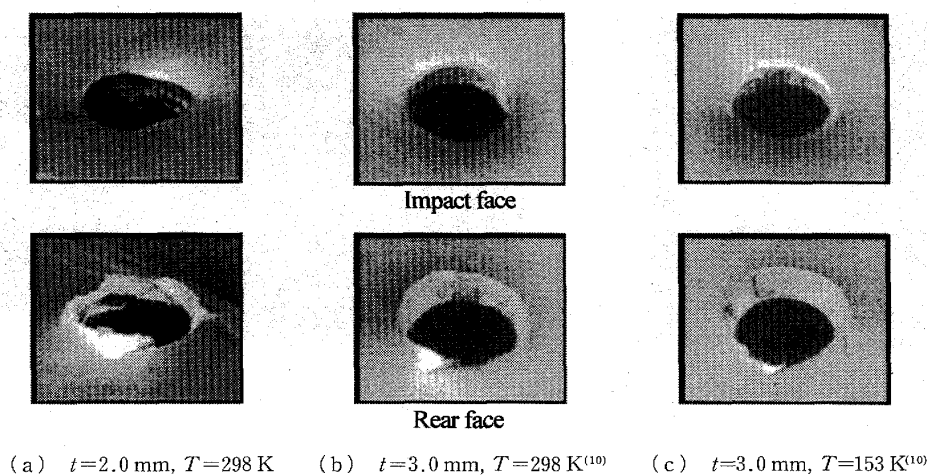


Fig. 5 Relationship between the size of penetration hole and the impact velocity

試験片貫通孔の面積と衝突速度( $v_i$ )の関係で、縦軸に試験片貫通孔の面積、横軸に衝突速度、図6は衝突速度0.5 km/s時のZK 60 A-T 5に生じた貫通孔の衝突面側および背面側からの拡大図、図7は衝突速度



(a)  $t=2.0$  mm,  $T=298$  K    (b)  $t=3.0$  mm,  $T=298$  K<sup>(10)</sup>    (c)  $t=3.0$  mm,  $T=153$  K<sup>(10)</sup>

Fig. 6 Photograph of penetration hole: ZK 60 A-T 5 at 0.5 km/s

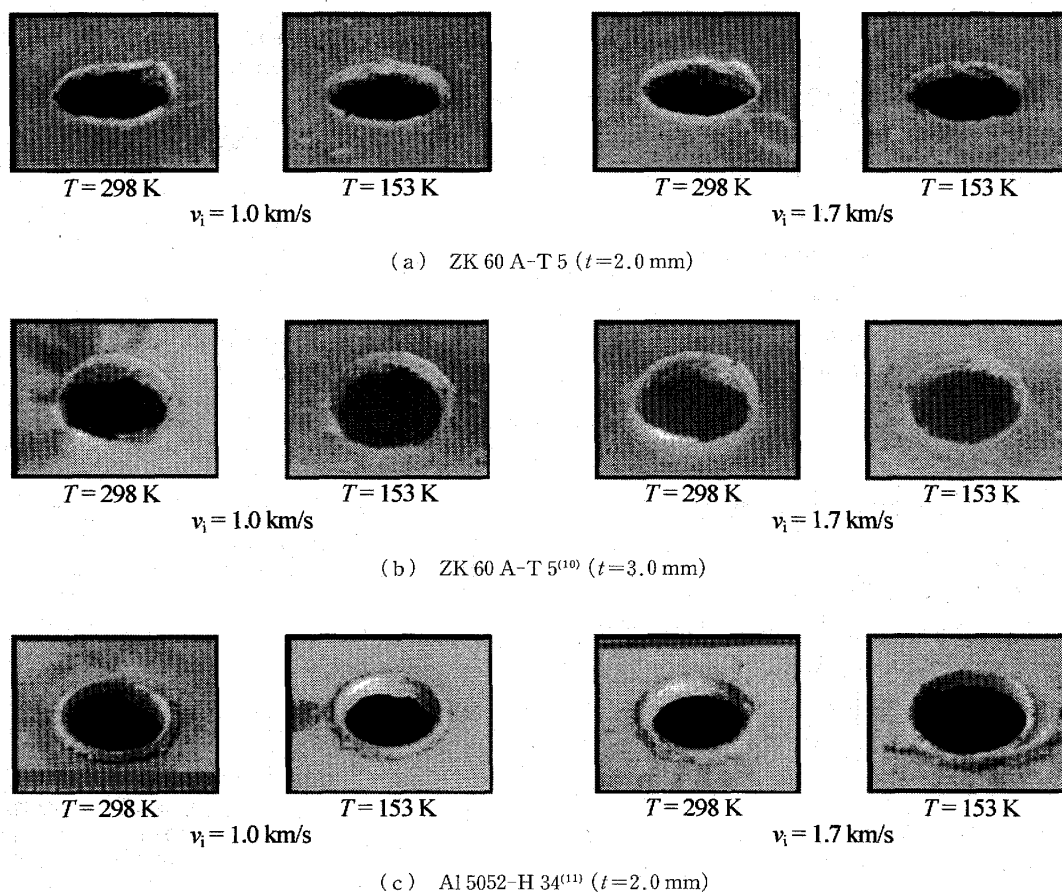


Fig. 7 Photograph of penetration hole at 1.0 and 1.7 km/s

1.0, 1.7 km/s 時の ZK 60 A-T 5 および Al 5052-H 34 に生じた貫通孔の衝突面側からの拡大図である。図 5 からわかるように、ZK 60 A-T 5 の貫通孔面積は衝突速度の増加に比例して増加し、速度による影響を受けることが確かめられた。そこで衝突速度 1.7 km/s 時の試験片厚さ 2.0 mm と 3.0 mm の貫通孔について比較検討した。その結果、試験片温度 298 K の

貫通孔面積に比し、153 K の場合はそれぞれ 2.7, 2.6%, Al 5052 H-34 の場合は、4.8% 低下し、温度による影響は、あまり認められなかった。このことは衝突速度が大きいことおよび低温脆性破壊が生じたことによるためと思われる。また、試験片厚さ 2 mm に比し 3 mm の貫通孔の面積は 31% 大きくなることがわかった。

そこで、ほぼ同じ面密度を有する ZK 60 A-T 5 (板厚 3 mm) と Al 5052-H 34 (板厚 2 mm) の貫通孔の面積を比較検討した結果、ほぼ同じ値を示すことがわかった。このことから、高速衝突時の貫通孔面積は試験片の厚さおよび面密度による影響を受けることが確かめられた。

図 6, 7 からわかるように、ZK 60 A-T 5 の試験片温度 298 K、衝突速度 0.5 km/s 時の貫通孔縁近傍は、飛行体の進行方向に沿って衝突面から背面へ塑性変形し、破面の様子から温度の低下 (153 K) にともなって脆性破壊することがわかった。衝突速度 1.0, 1.7 km/s 時の貫通孔は、試験片厚さ 2.0 mm に比し 3.0 mm の方が大きく、0.5 km/s で観察された変形は認められず、飛行体の進行方向の貫通孔縁には突起が形成され、衝突速度の増加にともなって縮小していることが確かめられた。Al 5052-H 34 の場合の貫通孔縁の突起は、飛行体の進行方向の外側にめくれ上がり、衝突速度の増加にともなって大きくなり、温度 153 K では部分的に剝離することがわかった。また、貫通孔内部の破面模様は ZK 60 A-T 5 の場合、不規則で凹凸が激しい base rock pattern が見られるのに比し、Al 5052-H 34 の場合は凹凸の少ない mirror pattern

が確かめられた。

そこで、衝突速度 1.7 km/s における ZK 60 A-T 5 の貫通孔断面および破面について調べた。その結果を図 8 に示す。図 8 からわかるように、貫通孔の円周方向には飛行体の衝突時に二次元的なせん断力が加わり飛行体の進行方向に垂直に明瞭なタイヤ・トラックがみられ、円周方向の中心には稜線が形成されることがわかった。このことは、飛行体が高速で衝突すると、飛行体の運動エネルギーが試験片 (バンパーシールド) の変形と衝撃波の発生エネルギーに変換され、飛行体内部と試験片内部に伝播すると同時に衝撃波が試験片前面および背面の自由表面で反射すると膨張波となり、引張応力が生じ試験片前面および背面近傍にはスポレーション (Spallation) が形成される。このスポレーションの空洞により、試験片前面および背面は、破壊され破片となって飛散することによるものと考えられる。また、衝突速度の増加に伴って稜線は板厚による影響を受け、発生位置が変化することがわかった。この事は、破面模様からも分かるように、温度 298 K の場合塑性変形するのに比し 153 K の場合は低温脆性破壊することによるものと考えられる。以上の結果からわかるように、全ての実験条件下で飛行体は試験

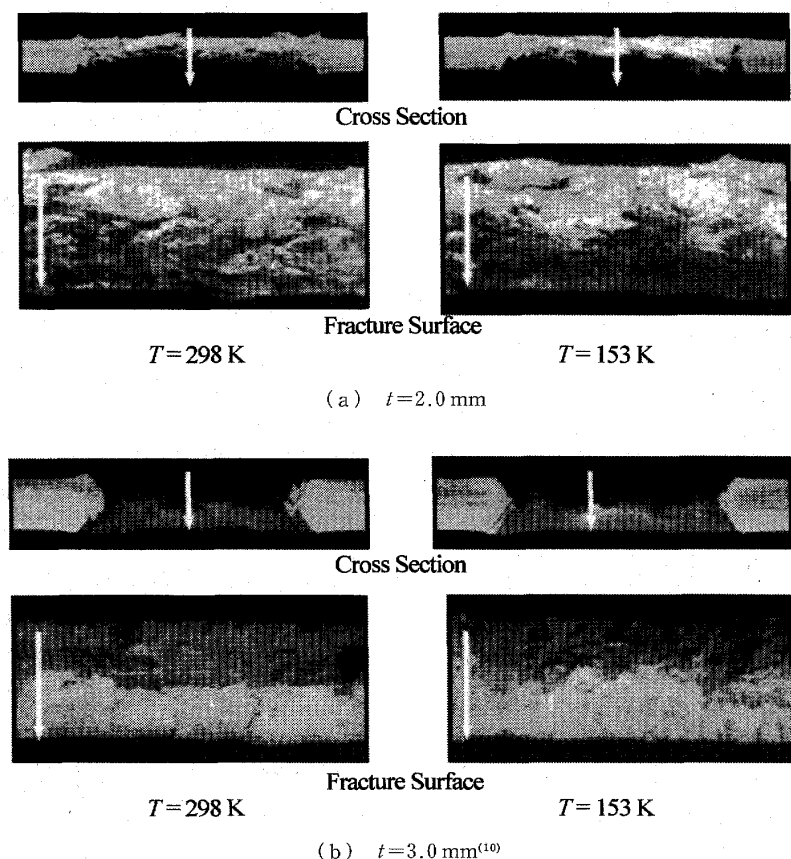


Fig. 8 Cross section and fracture surface: ZK 60 A-T 5 at 1.7 km/s (Arrow shows projectile flight direction)

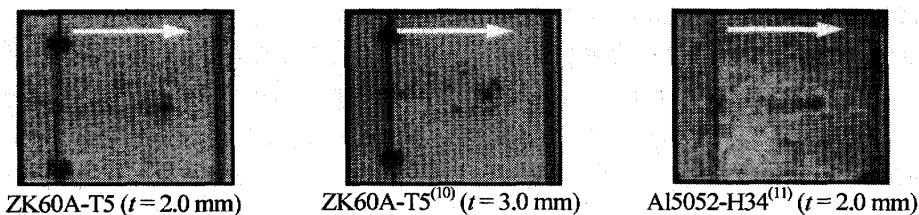


Fig. 9 Visualization image at 1.0 km/s with 298 K (Arrow shows projectile flight direction)

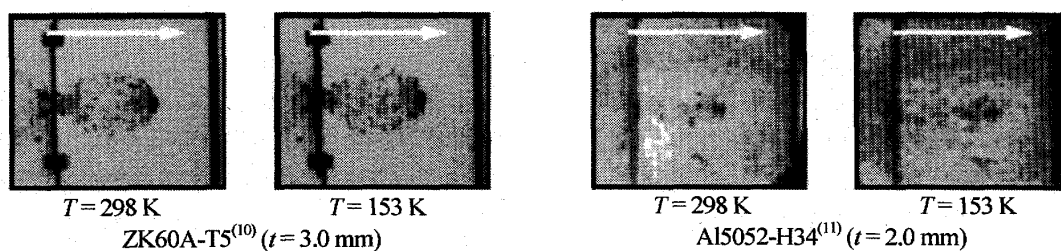
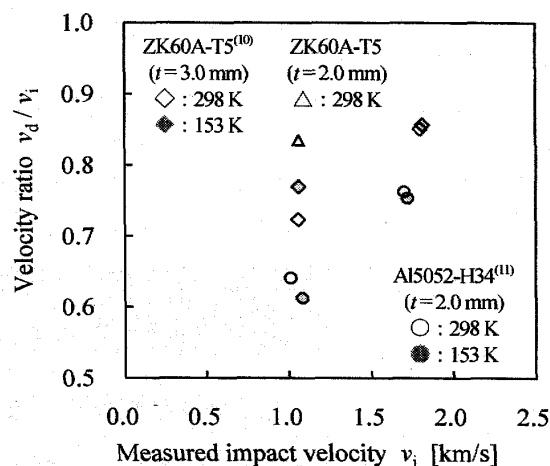


Fig. 10 Visualization image at 1.7 km/s (Arrow shows projectile flight direction)

片を貫通し、貫通孔の面積は速度および板厚の影響を受け、破面模様は板厚および温度による影響を受けることが確かめられた。

**3・2 貫通時の可視化像** 飛行体が試験片に衝突・貫通した時の可視化像について調べた。その結果を図9, 10に示す。ここで、図9はZK 60 A-T 5とAl 5052-H 34の衝突速度1.0 km/s, 温度298 Kの場合、図10は1.7 km/s, 板厚3.0 mmの場合である。図9, 10からわかるように、衝突速度1.0 km/s, 試験片厚さ2.0 mmの場合、ZK 60 A-T 5とAl 5052-H 34の前方にはイジェクタデブリ、後方にはデブリクラウドの発生は認められないのに対し、ZK 60 A-T 5試験片厚さ3.0 mmの場合はイジェクタデブリとデブリクラウドの発生が確かめられた。またZK 60 A-T 5とAl 5052-H 34の衝突速度1.7 km/s, 板厚3.0 mmの場合とともに、飛行体の入射軸に対して対称なイジェクタデブリとデブリクラウドが発生し、Al 5052-H 34に比しZK 60 A-T 5の場合はデブリクラウドの飛散範囲が拡大することが確かめられた。

そこで、試験片厚さの違いによるデブリクラウドの速度( $v_d$ )による影響について調べた。その結果を図11に示す。ここで、縦軸には飛行体衝突速度とデブリクラウドの速度の比、横軸には衝突速度を示す。図11からわかるように、衝突速度1.0 km/sの場合、ZK 60 A-T 5では、試験片厚さの増加にともなって、速度比( $v_d/v_i$ )が13.4%低下するのに比し、同じ厚さのZK 60 A-T 5とAl 5052-H 34を比較した場合、Al 5052-H 34の速度比が23.2%低下することが確かめられた。このことから、試験片厚さおよび材質の違い

Fig. 11 Relationship between  $v_d/v_i$  and  $v_i$ 

いがデブリクラウドの速度に影響を及ぼすことがわかった。

そこで、ほぼ同じ面密度を有するZK 60 A-T 5(2 mm)とAl 5052-H 34(3 mm)の速度1.0 km/sと1.7 km/sによる影響について調べた。その結果、ZK 60 A-T 5に比しAl 5052-H 34の方が衝突速度1.0 km/sでは16.0%, 1.7 km/sでは11.2%低くなり、Al 5052-H 34の方が飛行体の衝突によって生じるデブリクラウドの速度を減少させる効果が高いことが確かめられた。

**3・3 バックプレートの損傷** デブリクラウドの衝突によって生じたバックプレートの損傷について調べた。その結果を図12, 13に示す。ここで、図12は衝突速度0.5 km/s, 図13は1.0 km/sおよび1.7

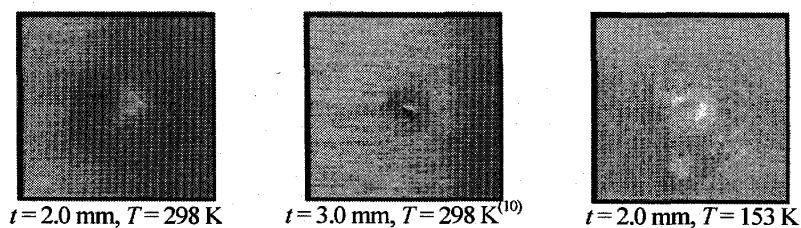


Fig. 12 Visualization image of ZK 60 A-T 5 at 0.5 km/s with 298 K

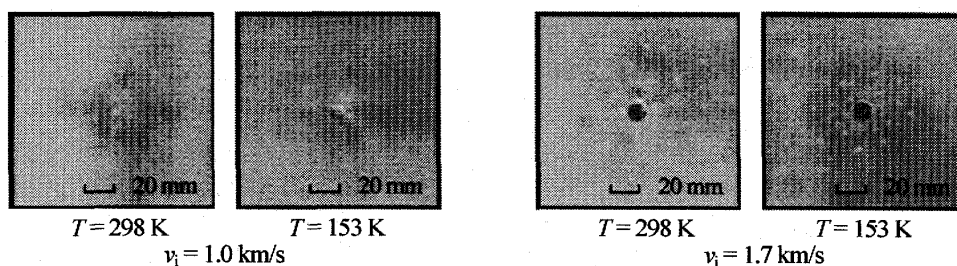
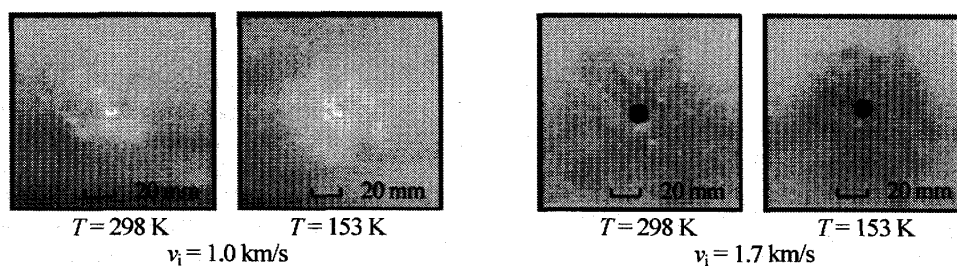
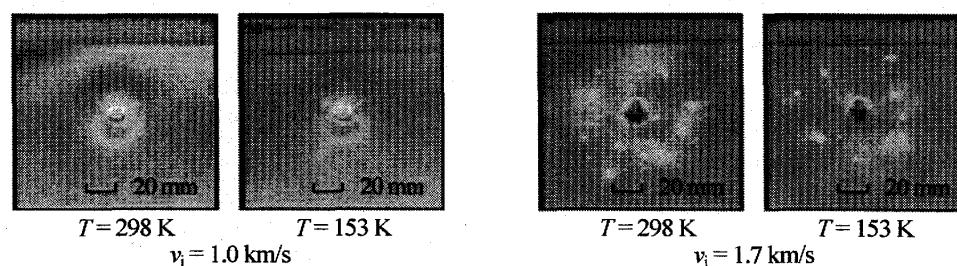
(a) ZK 60 A-T 5 ( $t=2.0$  mm)(b) ZK 60 A-T 5<sup>(10)</sup> ( $t=3.0$  mm)(c) Al 5052-H 34<sup>(11)</sup> ( $t=2.0$  mm)

Fig. 13 Photographs of back plate damage at 1.0 and 1.7 km/s

km/s におけるバックプレートで (a) は ZK 60 A-T 5 の試験片厚さ 2.0 mm, (b) は 3.0 mm, (c) は Al 5052-H 34 である。図 12, 13 からわかるように, ZK 60 A-T 5 の衝突速度 0.5 km/s, 温度 298 K 時のバックプレートの場合, 飛行体の衝突によって衝突痕のみ生じ, 温度の低下にともなって衝突痕の周囲には試験片の破片によるクレーターが発生するのに比し, 衝突速度 1.0 km/s 時には大きな衝突痕とクレーターの発生が確かめられた。また, 温度の低下および試験

片厚さの減少にともなって, クレーターによる損傷範囲が拡大し, それぞれのクレーターが小さくなるのに比し, Al 5052-H 34 の場合はクレーターの発生は認められなかった。しかし, 衝突速度 1.7 km/s 時には全てのバックプレートに貫通孔とクレーターの発生が確かめられ, 温度の低下にともなって損傷範囲が減少し, クレーターが小さくなることが確かめられた。

そこで, ZK 60 A-T 5 の試験片厚さ 2.0 mm と 3.0 mm を比較した場合, 厚さの増加にともなって損傷範

囲が拡大し、クレーターは小さくなるのに比し、同じ厚さ、ほぼ同じ面密度を有する ZK 60 A-T 5 と Al 5052-H 34 では、Al 5052-H 34 に比し、ZK 60 A-T 5 の方が、損傷範囲が広く、クレーターが小さいことがわかった。このことから、ZK 60 A-T 5 の試験片 ( $t=3.0$  mm) の場合はクレーターによる損傷は、浅く小さく広範囲に拡散するのに比し、Al 5052-H 34 の場合は、深く大きく狭い範囲に集中することが確かめられた。

#### 4. 結 言

本研究では、宇宙構造物へのスペースデブリの衝突を模擬し、極低温環境下でマグネシウム合金 ZK 60 A-T 5 の高速衝突実験を行い、同じ厚さのアルミニウム合金 Al 5052-H 34 と比較・検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) 試験片貫通孔面積と、飛行体衝突速度は実験した全範囲にわたって比例関係にあり、貫通孔の面積は試験片厚さおよび面密度による影響を受けることが確かめられた。

(2) 貫通孔破面模様は、ZK 60 A-T 5 の場合、base rock pattern が見られるのに比し、Al 5052-H 34 の場合はミラーパターンが見られ、ZK 60 A-T 5 の貫通孔の円周方向には飛行体の進行方向に垂直なタイヤ・トラックが見られ、円周方向の中心には稜線が形成されることが確かめられた。

(3) 円周方向に形成された稜線は、衝突速度、試験片温度、厚さによる影響を受け、発生位置が変化することがわかった。

(4) デブリクラウドの発生は試験片厚さによる影響を受け、飛散範囲は Al 5052-H 34 に比し ZK 60 A-T 5 厚さ 3.0 mm の方が大きく、速度は Al 5052-H 34 の方が低くなることがわかった。

(5) バックプレートの損傷は試験片の材質、温度、衝突速度による影響を受け、衝突速度 1.7 km/s 時の ZK 60 A-T 5 の損傷は浅く広範囲に拡散するのに比し、Al 5052-H 34 の損傷は深く狭い範囲に集中することが確かめられた。

#### 謝 辞

本研究は、埼玉工業大学オープンリサーチ・センター・プロジェクトの援助により行われた。ここに謝意を表す。

#### 文 献

- (1) Yo, K. and Tadao, I. eds., *Technologies & Applications of Magnesium Alloys*, (2006), pp. 219-226, CMC Publishing Co., Ltd.
- (2) Christiansen, E. L., Design and Performance Equations for Advanced Meteoroid and Debris Shields, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 14 (1993), pp. 145-156.
- (3) Gibbons, J. H., *Interagency Report on Orbital Debris*, NASA Orbital Debris Program Office (online), available from <[http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/IAR\\_95\\_Document.pdf](http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/IAR_95_Document.pdf)>, (accessed 2009-3-25).
- (4) Tetsuo, Y., *Problem of Space Debris*, (1997), p. 34, Shokabo.
- (5) United Nations Publication, *Technical Report on Space Debris*, NASA Orbital Debris Program Office (online), available from <[http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/UN\\_Report\\_on\\_Space\\_Debris\\_99.pdf](http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/UN_Report_on_Space_Debris_99.pdf)>, (accessed 2008-8-5).
- (6) Myers, B. A., Schonberg, W. P. and Williamsen, J. E., Temperature effects on bumper hole diameter for impact velocities from 2 to 7 km/s, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 29 (2003), pp. 487-495.
- (7) Francesconi, A., Pavarin, D., Giacomuzzo, C. and Angrilli, F., Impact experiments on low-temperature bumpers, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 33 (2006), pp. 264-272.
- (8) Tanaka, K., Nishida, M. and Takada, N., High-speed penetration of a projectile into aluminum alloys at low temperatures, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 33 (2006), pp. 788-798.
- (9) Christiansen, E. L., *METEOROID/DEBRIS SHIELDING*, NASA (online), available from <[http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/\\_techrep/TP-2003-210788.pdf](http://ston.jsc.nasa.gov/collections/TRS/_techrep/TP-2003-210788.pdf)>, (accessed 2008-5-12).
- (10) Kubota, R., Shimamoto, A., Numata, D. and Takayama, K., Evaluation of Perforation Resistance of Magnesium Alloy by Hypervelocity Impact, *Key Engineering Materials*, Vol. 385-387 (2008), pp. 129-132.
- (11) Daiju, N., Kiyonobu, O., Masataka, A., Kazuyoshi, T. and Sun, M., Experimental study of hypervelocity impacts at low temperatures, *Shock Waves*, Vol. 18 (2008), pp. 169-183.