

超高速衝撃荷重下におけるマグネシウム合金の変形応答に及ぼす添加元素の影響

○藤田直輝<sup>1</sup> 長谷川直<sup>2</sup> 中辻竜也<sup>3</sup> 池尾直子<sup>3</sup> 佐藤英一<sup>2</sup> 向井敏司<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 神大工 (院), <sup>2</sup> JAXA, <sup>3</sup> 神大工

## 1. 緒言

近年、エネルギー効率向上の観点から、構造物材料中最軽量であるマグネシウムが注目を集めている。その一例として打ち上げ、運用コスト削減が求められている宇宙航空機器への適用が挙げられる。人工衛星などの宇宙機器は衛星軌道上を数 km/s の超高速で運用され、スペースデブリなどとの超高速での衝突が考えられる。マグネシウムの応力波伝播速度は約 5.1 km/s であり、衝突速度はその速度を超える。このような数 km/s の変形応答を解明することはマグネシウムの適応範囲を拡大するうえで重要となる。

本研究ではマグネシウムに対して 7km/s の超高速衝突試験を行い、材料の内部組織の変化とイットリウム添加の効果を解明することを目的とした。純マグネシウムの鋳造材と押出材ならびに Mg-Y 合金押出材の変形組織観察により変形応答を考察した。また、衝突時の変形応答を定量的に理解するため、smoothed particle hydrodynamics (SPH)法<sup>1)</sup>シミュレーションを実施した。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

本研究では試験材料として、純マグネシウム押出材 (pMg-E)、純マグネシウム鋳造材 (pMg-C)、Mg-Y 合金押出材 (Mg-Y) を用いた。これらの材料を押出方向が衝突面と垂直になるように板状に加工し、試験片とした。残留ひずみを取り除くために pMg-E を 673 K で 16 時間、Mg-Y を 673 K で 2

時間焼きなまし処理を施した。試験材料の初期組織を SEM/EBSD により観察した。pMg-C は数 mm の粗大な結晶粒を有していた。pMg-E は平均結晶粒径約 60  $\mu\text{m}$  であり、Mg-Y は平均結晶粒径約 61  $\mu\text{m}$  であることがわかった。

### 2.2 超高速衝突試験

衝突試験は JAXA に設置されている二段式軽ガス銃<sup>2)</sup>を用いて、目標衝突速度を約 7.0 km/s として実施した。二段式軽ガス銃では火薬の燃焼により圧縮管内のピストンを加速し、軽ガスを断熱圧縮する。次に圧縮された軽ガスを開放することにより、飛翔体を数 km/s まで加速させる。加速された飛翔体は飛翔管を通り、真空チャンバー内の被衝突材に衝突する。今回は軽ガスとして水素を用いた。直径 1.0 mm のアルミナ球を飛翔体として用い、作製した試験片を被衝突材として用いた。これらの試験は室温と低温の二つの温度条件でそれぞれ行った。低温の試験では液体窒素により約 173K にまで試験片を冷却し、衝突試験を行った。試験後はマイクロ X 線 CT (CT) と SEM/EBSD による観察を行った。

### 2.3 SPH 法による計算シミュレーション

マグネシウムに対してアルミナ球が衝突した際の変形を予測するシミュレーションを行うにあたり ANSYS/AUTODYN を用いた。宇宙科学において衝突挙動の解析によく用いられている SPH 法を被衝突材のモデルに適用した。SPH 法では流体を多数の粒子に分割し、流体の動きを数値的に

解く。今回の計算では、衝撃線形状方程式を飛翔体と被衝突材に適用した。“Steinberg-Guinan 強度”をマグネシウムに用い、アルミナには二直線等方硬化則を用いた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 亀裂進展経路

試験片を CT により観察した。各材料において、低温条件の試験片では室温条件より亀裂の発生が顕著であった。Mg-Y は pMg-C および pMg-E に比べて、CT によって観察できる亀裂が少ないことがわかった。SEM / EBSD の結果から、pMg-C および pMg-E では亀裂が粒界に沿って進展していることが確認できた。一方で、Mg-Y では亀裂が粒内を進展している領域が確認された。これらのことから、イットリウム添加により、亀裂の進展経路に差異が生じたことが示唆された。

#### 3.2 内部組織変化

pMg-E の室温条件試験片について、クレーター底部周辺の内部組織を SEM / EBSD によって観察した。クレーターに接している領域では、平均結晶粒径数  $4.9 \mu\text{m}$  の微細結晶粒が確認され、ひずみ量は少ないことが確認された。クレーターから遠くなるにつれて結晶粒のサイズは大きくなり、1 mm 以上離れると微細結晶粒は確認されず亜結晶粒が観察された。また、クレーターからの距離が増加すると、ひずみの量も増加することが確認された。

Mg-Y の室温条件試験片において、クレーターに接している領域では、平均結晶粒径数  $2.1 \mu\text{m}$  の微細結晶粒が確認され、ひずみ量は少ないことが確認された。また、純マグネシウムと比較して結晶粒径が小さいこと

がわかった。イットリウム添加により積層欠陥エネルギーが低下したため、再結晶速度の低下が生じ、形成される再結晶粒の粒径が減少したと考えられる。

SPH による超高速衝突のシミュレーションでは、衝突時にクレーターから約 0.4 mm 以内の領域では、予測される温度はマグネシウムの融点である 923 K の半分以上であった。また、クレーターから約 0.23 mm 以内の領域では、予測される温度がマグネシウムの融点を超えていた。クレーターから約 1.1 mm 以内の領域では 0.2 以上のひずみが生じていることが推定された。また、約 1.0 mm 以内の領域では予測されるひずみが 0.2 程度であることがわかった。このことから、クレーター周辺では温度上昇とひずみにより再結晶および回復が発現することが予想された。

以上より、クレーター周辺で観察される微細結晶粒および亜結晶粒は、超高速衝突により発生した熱エネルギーとひずみにより形成された組織であることがわかった。

### 4. 結 言

純マグネシウムの超高速衝突では亀裂が粒界に沿って進展することが確認された。形成されたクレーター底部の近傍組織では再結晶が発現することがわかった。また、イットリウムの添加により亀裂は粒内を進展することが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) G.R. Liu and M.B. Liu: SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS A Meshfree Particle Method, ed. by G. R. Liu, World Scientific Printers (S) Pte Ltd, (2003), 26-32.
- 2) N. Kawai, K. Tsurui, S. Hasegawa and E. Sato: Rev. Sci. Instrum., **81** (2010), 115105.