

# 高強度アルミニウム合金における固相積層技術の研究開発

大阪大学 接合科学研究所

助教 王 倩

(2022 年度 慶祝研究助成 (若手研究者枠) AF-2022034-C2)

キーワード：金属 3D 積層、大変形、組織微細化

## 1. 研究の目的と背景

高強度アルミニウム合金は、その優れた強度対重量比、耐食性、および機械的特性により、航空機、自動車、及びその他の産業において広く利用されており、特に軽量化技術において重要な役割を果たしている。近年、持続可能な開発目標(SDGs)に基づく CO<sub>2</sub> 排出量削減の要求や、カーボンニュートラルの実現に向けた動きが加速する中、軽量化技術の重要性が一層高まっている。特に航空機や自動車における軽量化部品の需要が増加し、それに伴い高強度アルミニウム合金の市場規模は 2021 年に 349 億米ドルに達し、2026 年には 477 億米ドルに達すると予測されている。このような市場の成長は、軽量化技術の進展に寄与するものであり、今後多くの産業分野において高強度アルミニウム合金の需要が拡大することが期待されている。

航空機の補強材や自動車の構造部品など、軽量化部品の設計および製造において、3D 積層技術が重要な役割を果たすことが期待されている。3D 積層技術は、部品設計の柔軟性を向上させ、製造工程の効率化を促進する技術である。しかし、高強度アルミニウム合金における 3D 積層技術には、凝固欠陥や熱応力による品質低下が課題として存在している。これらの問題は、特に溶融積層技術を用いた場合に顕著であり、凝固過程での欠陥や熱応力が積層部品の品質に悪影響を与えることが多い。高強度アルミニウム合金に適した積層技術の開発が急務である。

このような課題を解決するため、コールドスプレー技術が有望なアプローチとして注目されている。コールドスプレー技術は、材料を溶融させることなく、高速で金属粉末を基材に衝突させることによって積層を行う技術であり、従来の溶融積層技術に比べて凝固欠陥や熱応力を抑制できるという特長を有している。また、環境負荷が低いため、持続可能な製造技術としての可能性を持ち、温室効果ガスの排出削減にも貢献することができる。これにより、従来技術では解決が難しかった高強度アルミニウム合金の積層に関する課題を克服できる可能性がある。

本研究の目的は、高強度アルミニウム合金に対する高品質かつ低コストなコールドスプレー積層技術を開発し、これを用いて従来技術における課題を解決することにある<sup>1,2)</sup>。具体的には、コールドスプレー技術を利用して、積層過程における凝固欠陥の抑制、熱応力の低減、および積層品質の向上を実現する最適プロセスを確立することを目指す。この研究によって、航空機や自動車の軽量化部品の設計および製造における新たな可能性を提供し、製造業

における技術革新を促進することが期待される。また、コールドスプレー技術の普及は、持続可能な製造プロセスの確立にも寄与するものであり、環境への配慮を考慮した製造技術の発展に貢献することができると考えられる。

## 2. 研究方法

本研究では、高強度アルミニウム合金を対象に、微細鍛造粒子を用いた積層プロセスの最適化とそのメカニズムの解明を目的としている。高強度アルミニウム合金は、その優れた強度対重量比、耐食性、耐熱性などの特性により、航空機、自動車、エネルギー産業など多くの分野で使用されており、軽量化技術として注目されている。しかし、これらの合金は積層プロセス中に微細構造の不均一性が発生しやすく、特に冷スプレー積層技術を用いた場合、これらの問題が顕著であるため、積層材の性能向上には新たなアプローチが必要である。本研究では、微細鍛造粒子を積層プロセスに導入することで、材料の微細構造を改善し、機械的特性を向上させることを目指す。具体的には、異なる粒径および体積比の微細鍛造粒子を使用し、最適設計を行うことで、積層材の強度、韌性、耐久性を向上させる。この研究により、冷スプレー積層技術における既存の問題を解決し、より高性能な積層材料を提供することを目的としている。

まず、微細鍛造粒子の粒径および体積比の最適設計を行う。異なる粒径を有する微細粒子と適切に処理された積層微粒子をさまざまな体積比で混合して使用する。これにより、積層材の微細構造、特に空隙、割れ、結晶粒の形成を実験的に観察する。特に、高強度アルミニウム合金における微細構造の形成に焦点を当て、粒子が均一に分布しているか、不均一に埋め込まれているかを確認し、最適な粒径および体積比を明確化する。さらに、積層材の機械的特性、特に引張強度を実験で測定し、最適な粒径および体積比を決定する。このプロセスを通じて、堆積材の性能を最大化するための最適条件が明確になる。

次に、積層プロセスにおける微細鍛造の数値解析モデルを開発する。微細鍛造粒子を使用する場合と使用しない場合の積層微粒子の変形、温度分布、エネルギー、および再結晶状態を比較研究する。この比較により、微細鍛造粒子が高強度アルミニウム合金の積層材に与える影響を解明し、定量的な関係を導き出す。さらに、微細鍛造の強化メカニズムを明らかにし、最適なプロセスパラメータを特定する。この解析は、積層プロセスの理解を深め、後続の実

験に対する有益な指針を提供する。

最後に、数値解析結果を基に積層実験を実施し、最適な積層条件範囲を決定する。具体的には、衝突速度や衝突温度が積層材の微細構造および機械的特性に与える影響を、実験観察と数値解析を通じて明確にする。衝突速度および温度は、使用する作動ガスの種類、圧力、温度などのパラメータによって決定されるため、これらを体系的に評価し、最適な積層条件を特定する。最終的に、積層条件、微細構造、機械的特性の定量的関係を解明し、鍛造品レベルの強度を目指した最適な積層条件範囲を確立する。

本研究の方法論は、高強度アルミニウム合金を用いた積層技術の最適化を進め、堆積材の性能向上に貢献する新たな積層プロセスの確立が期待される。また、この研究は、他の高性能材料や積層技術への応用可能性を広げ、産業界での実践的な応用に向けた道を開くことができると考えられる。

### 3. 研究成果

#### 3・1 伝統的コールドスプレー積層製造(CSAM)（基礎および比較対象）

図1は、異なる衝撃速度下で高強度アルミニウム合金微粒子( $dP=34\mu m$ )の有効塑性ひずみ(EPS)分布に基づく全体的な変形を示している。衝撃速度( $V_i$ )の増加に伴い、粒子の変形が顕著になり、変形パターンは変わらないことが確認された。高強度アルミニウム合金微粒子の自己衝突は、顕著な不均一な変形特性を示すことが明らかとなった。微粒子の上部はほとんど変形せず、変形は界面に向かって次第に増加することが観察された。大きな塑性変形は主に界面付近で発生し、特に界面の端で顕著であることが示された。この界面における不均一な変形は、界面接合の不均一性と一致し、変形が接合における決定的な役割を果たすことを示唆している。

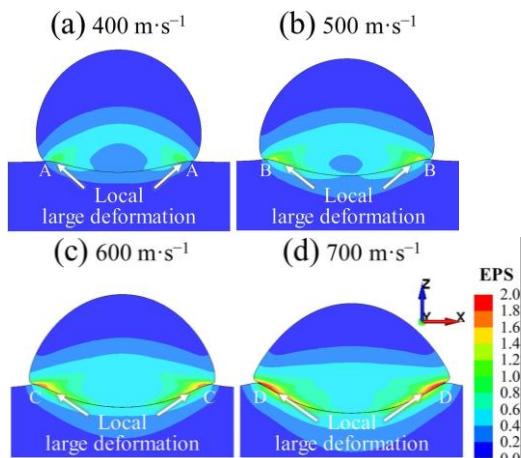


図1 超音速衝撃後の高強度アルミニウム合金微粒子( $dP=34\mu m$ )の全体的な変形、(a)  $400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(b)  $500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(c)  $600\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(d)  $700\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、大尺寸颗粒を使用しない場合

図2は、異なる衝撃速度下で高強度アルミニウム合金微粒子( $dP=34\mu m$ )の結晶粒細化を示している。衝撃速度( $V_i$ )の増加に伴い、結晶粒の細化が顕著になり、分布パターンに変化はないことが確認された。結晶粒細化には明確な不均一性が見られる。全体として、結晶粒の細化は界面付近で主に発生し、上部ではほとんど細化が見られない。さらに、界面付近を観察すると、細粒は中心ではなく界面端に主に現れることが確認された。衝撃速度( $V_i$ )の増加に伴い、界面端の細粒領域が拡大する傾向も見られた。不均一な界面変形と結晶粒細化は、界面接合の不均一性と一致しており、これにより変形による酸化膜の破裂と動的再結晶が接合における主要な原因であることが示唆された。これらの結果は、原位ショットピーニングの重要な役割を明示するための基盤を提供する。

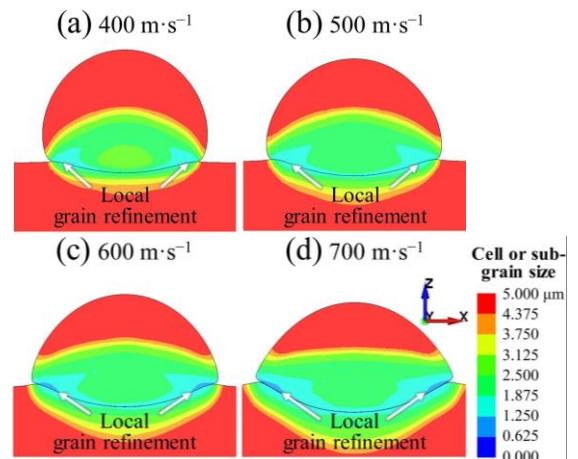


図2 超音速衝撃後の高強度アルミニウム合金微粒子( $dP=34\mu m$ )の結晶粒細化、(a)  $400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(b)  $500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(c)  $600\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(d)  $700\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、大尺寸颗粒を使用しない場合

#### 3・2 大尺寸颗粒が極端変形に与える影響

大尺寸颗粒が堆積微粒子の変形に与える影響は、まだ明確に解明されていない。これを明確にするため、我々は一連のシミュレーションを実施し、図3に示すように、大尺寸颗粒が高強度アルミニウム合金微粒子の変形に与える影響を可視化した。図3bに示すシミュレーションモデルは、実験に基づいて構築されたものであり、ここでは高強度アルミニウム合金微粒子と大尺寸颗粒が同一位置でそれぞれ  $500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  および  $285\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  の衝撃速度で衝突した。図3a, c, dに示すシミュレーションモデルは、図3bの結果を基に、異なる衝撃速度で高強度アルミニウム合金微粒子の衝撃を仮定し、衝撃速度と大尺寸颗粒の影響の2つの観点から詳細に議論を行った。従来の冷スプレー積層製造(CSAM)において、微粒子の衝撃速度( $V_i$ )はその変形に影響を与える重要なプロセスパラメータであることが広く認識されている。しかし、大尺寸颗粒の衝撃が、微粒子自身の衝撃よりも優先的に変形を支配するのが、大尺寸颗粒支援冷スプレー積層製造の特徴である。高強度アルミニウム合金微粒子の衝撃速度( $V_i$ )が如何であれ、大尺寸颗粒の助

けを借りて、それらは全体的に極端な変形を経ることが確認されている（図3参照）。大尺寸颗粒は、この過程ではなく変形しない。さらに、衝撃速度( $V_i$ )の増加に伴い、微粒子の上部中心での局所的なEPSがわずかに減少する傾向が見られる。この現象の理由として、高強度アルミニウム合金微粒子が高い衝撃速度で平坦になり（高さが低くなる）、その結果、大尺寸颗粒による衝撃の変形空間が制限されるためである（最終的な変形曲率は同一である）。実際には、大尺寸颗粒と高強度アルミニウム合金微粒子の衝撃位置がずれるため、この局所的なEPS減少は回避可能であるが、ここでは詳細には言及しない。

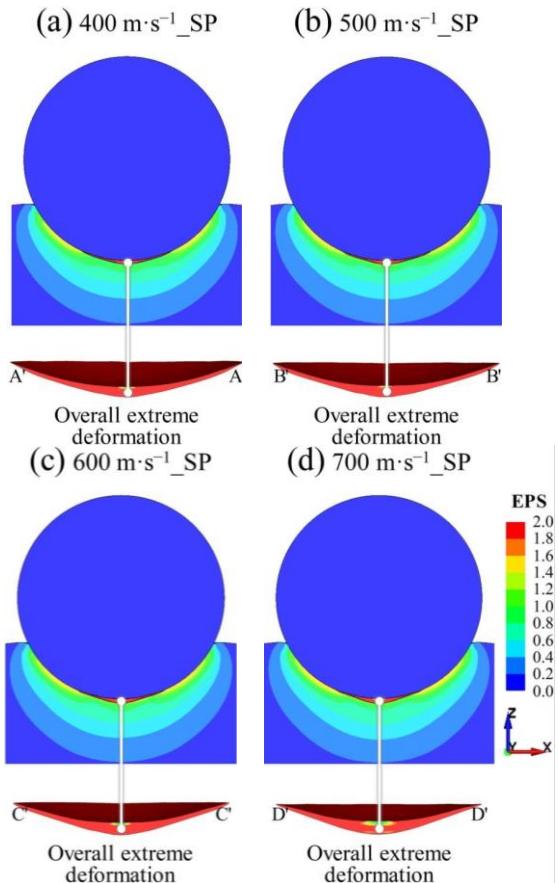


図3 超音速衝撃後、大尺寸颗粒を使用した高強度アルミニウム合金微粒子 ( $d_P=34\mu\text{m}$ ) の全体的な変形、(a)  $400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(b)  $500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(c)  $600\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(d)  $700\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

### 3・3 大尺寸颗粒が晶粒細化および機械的特性に与える影響

大規模な塑性変形は、微細構造の進化と密接に関連している。第3.1節で明示されているように、粒子自撞撃は局所的な大変形を引き起こし、それが不均一な晶粒細化につながる。大尺寸颗粒は、さらに強い変形を引き起こす。しかし、大尺寸颗粒が晶粒細化に与える役割と変形との関連性は完全には解明されていない。この点を明確にするため、図4に示すように、図3に関連する晶粒細化の結果を示す。図4は、異なる超音速衝撃速度下で、大尺寸颗粒を使用した高強度アルミニウム合金微粒子 ( $400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

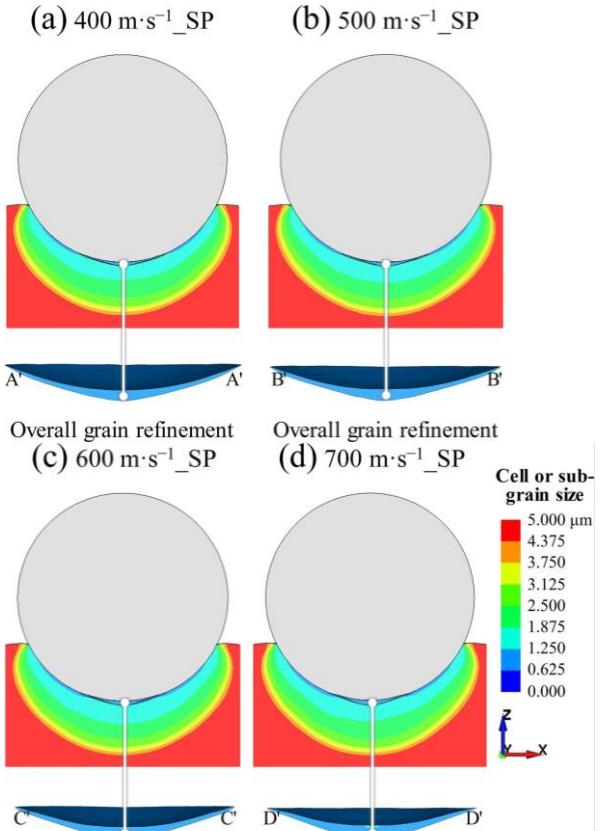


図4 超音速衝撃後、高強度アルミニウム合金微粒子 ( $d_P=34\mu\text{m}$ ) の晶粒細化、(a)  $400\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(b)  $500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(c)  $600\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、(d)  $700\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、大尺寸颗粒を使用した場合

$600\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $700\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) の晶粒細化を示している。大尺寸颗粒の衝撃により、高強度アルミニウム合金微粒子は全体的に晶粒が細化することが明らかとなった。さらに、均一な超細晶粒が全体的な極端な変形の結果として示唆されている。これにより、変形と微細構造の進化が効果的に関連付けられることが示されている。大尺寸颗粒の影響下では、晶粒細化は高強度アルミニウム合金微粒子の  $V_i$  にはほとんど影響されない。これにより、晶粒細化における大尺寸颗粒の支配的な役割が示されている。したがって、全体的な晶粒細化は大尺寸颗粒のもう一つの重要な役割であると結論できる。

大尺寸颗粒が晶粒細化に与える役割をより良く理解するために、図2および図4のシミュレーション結果を直接比較し、図5に示した。まず、図5aおよびbにおいて、接触部と中央線に沿った局所的な細胞または亜晶粒のサイズ分布を示し、大尺寸颗粒の有無を比較した。この結果は、粒子自撞撃による晶粒細化の不均一性を強調している。変形とは異なり、不均一性は中央線沿いでより顕著であり、 $V_i$  に依存する。シミュレーション結果では、界面でのより小さな細胞または亜晶粒が、主に粒子自撞撃によって引き起こされた界面変形に起因していることが示されている。一方、大尺寸颗粒による全体的な晶粒細化が強調され

ている。高強度アルミニウム合金微粒子の界面および内部には超細細胞または亜晶粒(約 $1\text{ }\mu\text{m}$ )が確認されている。さらに、図5cでは、実験に基づくシミュレーションで接触部における細胞または亜晶粒のサイズの進化を示し、不均一から均一な超細晶粒への進化を明示している。晶粒細化は界面端から始まり、次第に界面中心に向かって進行する。変形が進行するにつれて、細化した晶粒のサイズは徐々に小さくなる。粒子自撞撃後、界面端での細胞または亜晶粒が最小であり、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下である( $\leq 40\text{ ns}$ )。大尺寸颗粒を用いた高強度アルミニウム合金微粒子では、全体の晶粒が $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下である。

従来のコールドスプレー積層製造および大尺寸颗粒支

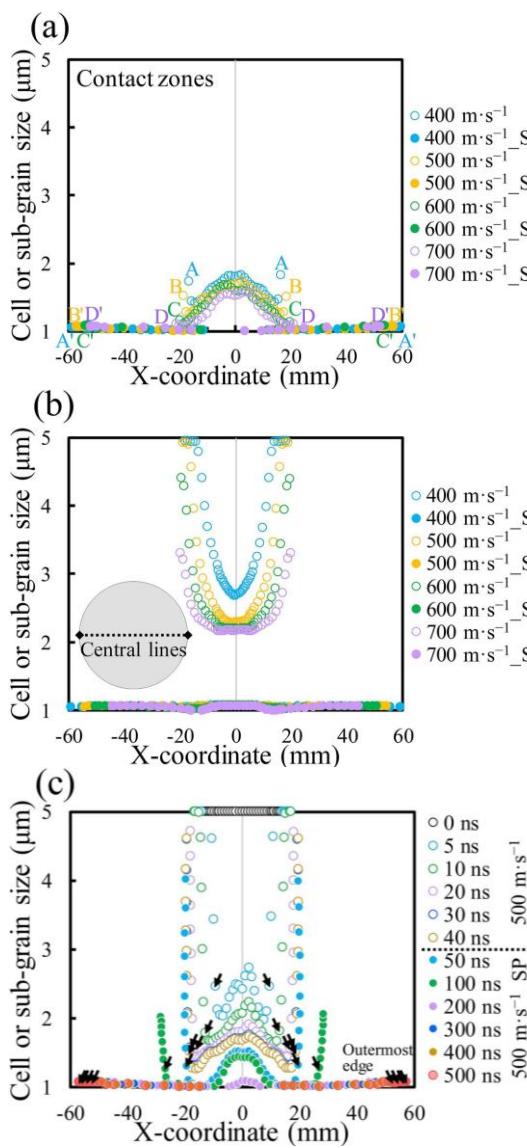


図5 超音速衝撃後、接触部(a)および中央線(b)における晶粒または亜晶粒のサイズ比較、衝撃速度 $400$ 、 $500$ 、 $600$ 、 $700\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、無大尺寸颗粒および有大尺寸颗粒の場合で比較。(c)  $500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ での接触部における晶粒または亜晶粒サイズの進化、無大尺寸颗粒および有大尺寸颗粒の場合

援のCSAM堆積物における実際の晶粒サイズ分布は、EBSDによって特性評価され、図6aおよびbに示されている。高角度( $>15^\circ$ )および低角度( $5^\circ$ – $15^\circ$ )の晶界は、それぞれ黒色および赤色の線で示されている。サイズ分布の違いは顕著である。従来のCSAM堆積物における晶粒細化によって生成された細粒は、主に界面付近に現れる。高強度アルミニウム合金微粒子内部の晶粒サイズは、界面でのサイズよりも明らかに大きい。なお、高強度アルミニウム合金微粒子の変形不足により、界面には不可避的に空隙が存在することが、第3.2節で詳細に議論されている。対応する単粒子および多粒子衝撃シミュレーション(図6c)によって、界面での晶粒細化が再現可能であり、粒子自撞撃の特徴が識別されている。一方、大尺寸颗粒支援によるCSAM堆積物では、均一な超細晶粒(約 $1\text{ }\mu\text{m}$ )が観察される。シミュレーション結果(図6d)は実験結果と高い一致を示し、大尺寸颗粒が高強度アルミニウム合金微粒子の均一な超細晶粒形成において決定的な役割を果たすことをさらに確認している。

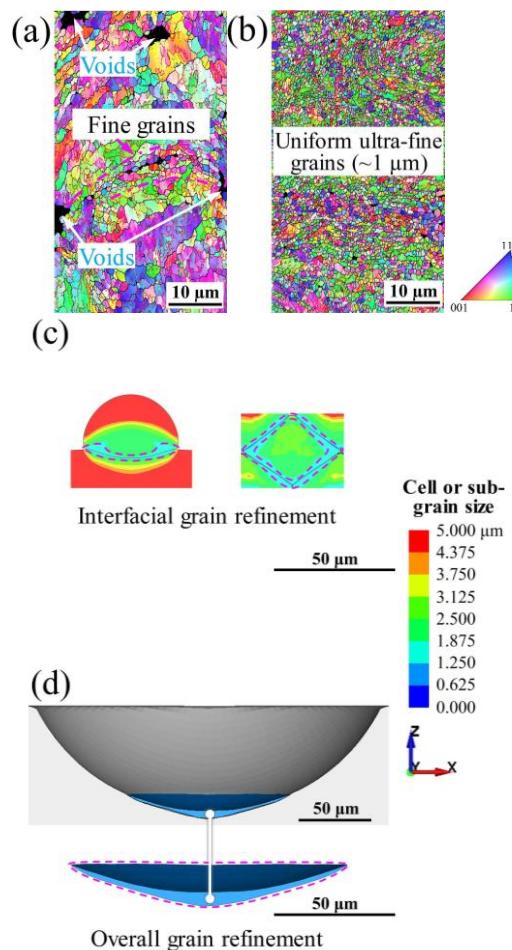


図6 コールドスプレー増材製造における高強度アルミニウム合金堆積物の実際の晶粒サイズ分布、 $500\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ での衝撃速度下で、微粒子および $285\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の大尺寸颗粒、体積比(a)0%および(b)70%、シミュレーション結果との比較。(c)大尺寸颗粒なしおよび(d)大尺寸颗粒ありの場合

#### 4. 結び

本研究では、低成本で再生可能な窒素ガスと再利用可能な大尺寸颗粒を使用し、大尺寸颗粒支援によるCSAMを採用することで、均一な超細晶粒を有する高密度な高強度アルミニウム合金堆積物を作製した。位錯ダイナミクスに基づく多物理場フレームワークを開発し、これにより従来のCSAMとの類似点と相違点を識別し、微鍛造の原理を解明した。シミュレーション結果と実験結果を比較することによって、変形、晶粒細化、微細硬度の向上、および堆積物の完全密実化を達成するために必要な大尺寸颗粒の体積比が完全に検証された。大尺寸颗粒の作用により、堆積微粒子の $V_i$ が半分であっても、その提供される動エネルギー(KE)は二桁高く、これによって堆積微粒子は全体的に極端な変形を経て、全体的な晶粒細化を伴い、微細硬度および引張強度が著しく向上した。

本研究の成果は、高強度アルミニウム合金の高品質・低成本なCSAMに関する科学的指針を提供し、SDGsやカーボンニュートラルに貢献するものである。さらに、本研究で構築したモデルは、プロセス、微細構造、性能との直接的な関連を明確にし、普遍的に適用可能であり、大尺寸顆

粒支援によるCSAMは、さまざまな難変形金属材料の最適設計ツールとして十分に活用できることが示されている。今後、さらに多くの高性能材料への応用が期待され、産業界での実践的な応用が進むことが見込まれる。

#### 謝 辞

本研究において、特に天田財団からの支援と助成に深く感謝する。天田財団の支援により、実験および研究を円滑に進めることができ、成果を得ることができた。また、研究の進行にあたり、ご協力いただいたすべての同僚や関係者に対しても、心より感謝する。

#### 参考文献

- 1) Wang Q · Ma N · Shi J · Huang W · Luo XT · Geng P · Zhang M · Zhang XC · Li CJ: Materials & Design, 112451 (2023), 236.
- 2) Wang Q · Ma N · Huang W · Shi J · Luo XT · Tomitaka S · Morooka S · Watanabe M: Materials Research Letters, 742–8 (2023), 11.