

析出強化型高強度アルミニウム合金の ワイヤ積層造形体におけるマイクロ組織・ 機械的性質の制御指針の提示

佐藤 裕

東北大学 大学院 工学研究科

1 はじめに

高強度アルミニウム合金の多くは、微細な析出物により強化されており、航空機やロケットなどの軽量かつ高強度が要求される分野で広く利用されている。2319アルミニウム合金は、ロケット燃料タンク用アルミニウム合金向け溶接材料であり、ワイヤアーク積層造形 (Wire Arc Additive Manufacturing; WAAM)¹⁾に用いることで、航空・宇宙分野の大型部品等への適用が期待される。しかし、2319アルミニウム合金の機械的性質は、強化析出物 (Al_2Cu) の分布・密度に大きく依存し、析出物は熱が加わることで敏感に固溶・過時効する。複雑な熱サイクルが付与される WAAM²⁾ 後には、非常に複雑な機械的性質分布になる可能性があるが、造形体の結晶粒径やポロシティ分布に関する報告³⁾はあるものの、造形後の析出状態や機械的性質分布に関する知見は少ない。さらに、造形体の機械的性質の向上には、後熱処理が有効と考えられるが、造形体のマイクロ組織や機械的性質に及ぼす後熱処理の影響も明らかになっていない。本研究では、2319アルミニウム合金造形体を WAAM により作製し、造形ままと後熱処理を行った造形体のマイクロ組織と硬さ分布を調べ、機械的特性に優れた造形体を得るための造形プロセスならびに造形後熱処理条件を実験的に明らかにすることを目的とした。

2 実験方法

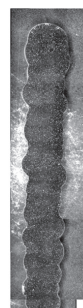
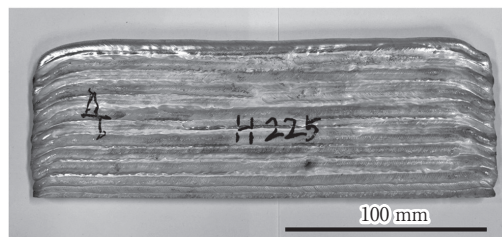
6061アルミニウム合金基材の上に、ER2319ワイヤ ($\phi 1.2\text{mm}$) と CMT プロセスを用いて、25パスの壁状造形体を作製した。ワイヤ供給速度 6 m/min 、溶接電流 96 A 、アーク電圧 11.7 V を一定とし、走行速度を $5\sim 14\text{mm/s}$ の範囲で変化させることで、入熱を変化させた。造形後、造形体の一部を切り出して人工時効 (463K ,

129ks) と溶体化処理 (solution heat treatment; SHT) (803K , 3.6ks) 後に人工時効を行った試験片を作製した。造形まま、人工時効後、SHT+人工時効後の3種類の試験片に対して、高さ方向 (造形方向) のビッカース硬さ分布を測定するとともに、マイクロ組織分布を SEM ならびに EDS により調べた。

3 実験結果

図1に走行速度が 5 mm/s と 14mm/s で得られた造形体の外観写真と断面マクロ写真を示す。走行速度を増加させることで、造形体の高さと幅は減少した。造形体内を SEM にて詳細に観察した結果、いずれの造形体にもポロシティが分布していた。ポロシティの面積分率は

Travel speed = 5 mm/s



Travel speed = 14 mm/s

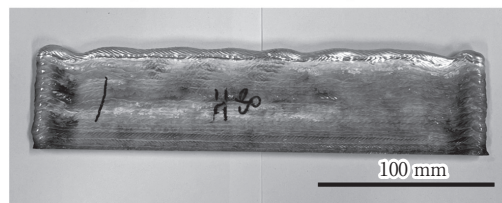


図1 WAAM造形体の外観写真と断面マクロ写真

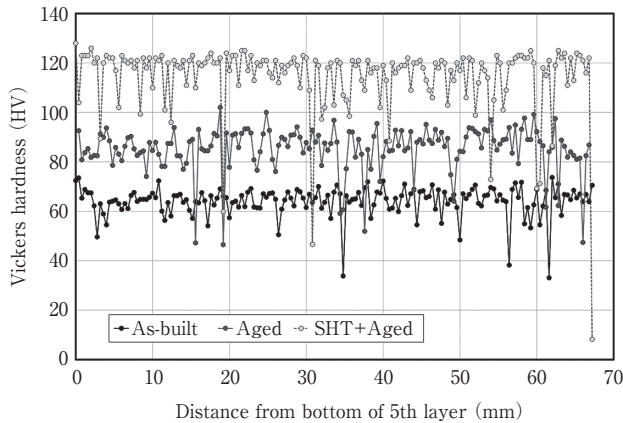


図2 走行速度 5 mm/s で得られた造形体の硬さ分布 (造形まま : As-built, 造形後人工時効 : Aged, 造形後溶体化処理+人工時効 : SHT + Aged)

1.0~3.5%であったが、面積分率に及ぼす走行速度の影響はほとんど見られなかった。

図2に走行速度 5 mm/s で得られた造形体の高さ方向の硬さ分布を例として示す。なお、走行速度を増加させて得られた造形体の硬さ分布も調べたが、硬さ分布に及ぼす走行速度の影響はほとんど見られなかった。造形まま材、後熱処理材のいずれにおいても、造形体内に分布するポロシティにより、硬さ分布に大きなばらつきが見られた。平均硬さは造形まま材では64HVであったが、人工時効後には85HV、SHT+人工時効後には115HVとなった。いずれの試験片においても、高さ方向に対する平均硬さは均一であり、SEM観察の結果、造形体マイクロ組織も高さ方向に対してほぼ均一であった。WAAMでは、壁状造形体の上部での抜熱が限定されるため、冷却速度が変化し、造形体の高さ方向で析出現象に差が出る可能性があるが、これらの結果は、本研究の造形体では高さ方向に対する析出現象にほとんど差はないことを示唆していた。

図3に走行速度 5 mm/s で得られた造形体 (25パス目領域) のSEM写真を示す。造形ままでは、最終凝固部に α -Al と θ -Al₂Cu の共晶組織が存在し、その周りに明るいグレーの母相領域が観察されたが、微細析出はほとんど見られなかった。明るい母相領域の組成分析を行った結果、暗い母相領域に比べてCu量が増加しており、Cu偏析が確認された。走行速度の増加とともに、 $\alpha + \theta$ 共晶組織が微細になるものの、その他のマイクロ組織の特徴に変化は見られなかった。人工時効後、 $\alpha + \theta$ 共晶組織周りのCu偏析部において微細な析出物が観察された一方、暗い母相領域では析出は生じなかった。共晶組織

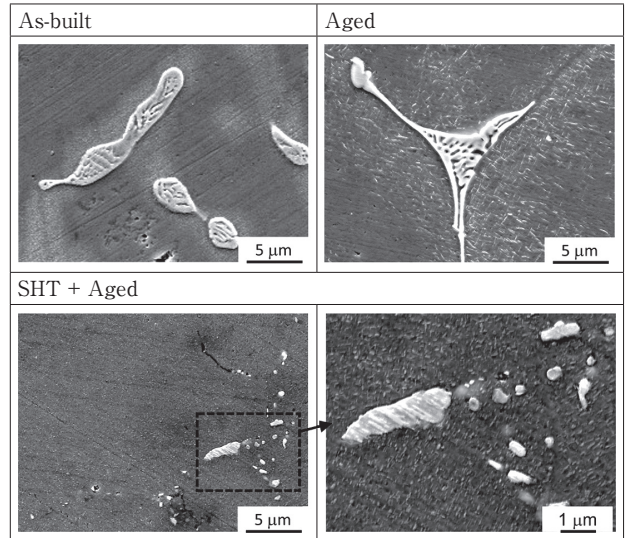


図3 走行速度 5 mm/s で得られた造形体のマイクロ組織に及ぼす熱処理の影響 (造形まま : As-built, 造形後人工時効 : Aged, 造形後溶体化処理+人工時効 : SHT + Aged)

周りでの微細析出により、人工時効による硬さ増加が生じたものと推察された。SHT+人工時効を行った結果、 $\alpha + \theta$ 共晶組織の面積率と母相中のCu偏析が減少したため、極めて微細な強化析出物が試験片全面に観察され、著しい硬さ増加が達成された。

4 まとめ

2319アルミニウム合金WAAM造形体において、マイクロ組織は走行速度の減少、すなわち入熱の増加とともに粗大化したが、本研究で用いた造形条件の範囲内では、造形中にはすべての領域において凝固偏析のみが生じ、析出現象に及ぼす接合速度の影響は限定的であった。造形体に対して種々の後熱処理を実施した結果、造形体の機械的性質を向上させるには、溶体化処理後に人工時効を行うことで、微細な強化析出物が均一に形成させるのが有効であることが分かった。

参考文献

- 1) K.S.Derekar : A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminum, Materials Science and Technology, Vol.34(2018), 895-916.
- 2) Z.Lyu, Y.S.Sato, S.Tokita, Y.Zhao, J.Jia, A.Wu : Microstructure evolution in a thin wall of 2Cr13 martensitic stainless steel during wire arc additive manufacturing, Materials Characterization, Vol.182(2021), 111520.
- 3) B.Cong, Z.Qi, B.Qi, H.Sun, G.Zhao, J.Ding : A comparative study of additively manufactured thin wall and black structure with Al-6.3%Cu alloy using cold metal transfer process, applied sciences, Vol.7(2017), 275.