

電子ビーム積層造形で作製したTi-6Al-4V造形体の造形品質に及ぼすオーバーハング角度の影響*

黒須 信吾**

電子ビーム金属積層造形法を用いて、種々のオーバーハング角度を有するTi-6Al-4V造形体を造形し、寸法精度やサポートの有無による表面粗さの変化について調査した。サポートの無い状態で、オーバーハング角度が小さくなると、表面粗さが増加し、25°以下では測定できないほどの変形が確認された。一方、サポートを付加することにより、変形は抑制され、25°以下においても変形なく造形でき、平均表面粗さ20~25 μmに改善できることがわかった。

キーワード：電子ビーム積層造形、Ti-6Al-4V合金、オーバーハング角度、平均表面粗さ(Ra)、サポート

Effect of Overhang Angle on the Quality of Ti-6Al-4V Alloy Object Fabricated by Electron Beam Melting

KUROSU Shingo

Key words : Electron Beam Melting, Ti-6Al-4V alloy, Overhang angle, Arithmetic mean roughness(Ra), Support

1 緒言

金属粉末積層造形法は、金属粉末を出発材料とし、3DCADデータから作成した2Dスライスデータを電子ビームまたはレーザービームを用いて選択的に熔融、積層することで3D形状を造形する手法である。最終製品形状近くまで造形できる高いニアネットシェイプ特性を有しているため、製品試作に係る期間を大きく短縮化することができ、よりスピーディに試作開発を進める方法として期待されている。

一方、本造形法は、積層方向に対して下方向の面を有する場合、オーバーハング角度が小さくなるに伴い、粉末床の上に新たに造形される面（下層に造形物の無い面）の面積が増加する。そのため、熔融した金属の粉末床への沈み込み、放熱不足による変形などが生じ、形状変形などの造形不良を引き起こす。オーバーハング角度によっては造形物に対してサポート（支持材）を付加し、造形物の支持や放熱を促進することも必要となる。本造形法の適用を広げるためには、オーバーハング角度による造形不良やサポート付加の最適化の検討が不可欠である。

そこで本研究では、Ti-6Al-4V合金粉末を用いて、電子ビーム金属積層造形法により種々のオーバーハング角度を有する造形体を作製し、オーバーハング角度が及ぼす造形品質（寸法精度、表面粗さ）への影響について調査した。さらに、サポート付加による効果についても調べた。

2 実験方法

2-1 造形サンプル

造形に用いた装置はARCAM社製のEBM®A2Xである。材料にはメーカ指定のTi-6Al-4V ELI合金粉末(+45/-106、 $d_{50}=70 \mu\text{m}$)を用い、装置メーカから提供された造形条件によってサンプルを作製した。

図1に、造形サンプルの概略図を示す。造形サンプルは、基本サイズを幅10mm、厚さ5mmとし、高さを50mmに合わせて、種々のオーバーハング角度を付けた。オーバーハング角度(θ)は、水平面(XY面)とモデルの下面から成る角度とし、5°から90°まで5°刻みで付加させた。

図2に造形サンプルの配置図を示す。同図に示すように、粉末を敷布する方向(Raking direction、x方向)に対してサンプル幅方向を垂直(z)および平行(y)になるように配置した。各々の配置をA配置、B配置と呼称する。また、サポート付加の効果进行调查するために、サポートを付けたサンプルと付けないサンプルを造形した。サポートはメーカ推奨条件に準じ、オーバーハング角度が65°よりも小さいサンプル($\theta < 65^\circ$)に付加させ、別ロットで造形した。サンプル配置に関しても、サポートなしと同様に配置した。

2-2 造形品質評価

造形品質評価として、寸法と表面粗さを測定した。寸法は、サンプルの幅と厚さについてマイクロメータを用いて、図1に示すサンプル上部と下部について各2か所

* 平成30年度 技術シーズ創生研究事業（育成ステージ）

** 素形材技術部（現 素形材プロセス技術部）

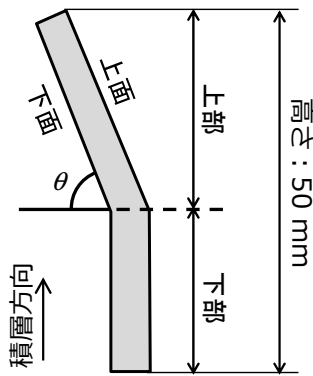


図1 造形サンプルの概略図

測定し、平均値を算出した。上部はオーバーハング角度を付加させている部位でオーバーハング形状による影響を受けている箇所、下部はオーバーハング角度を付けていない部位（オーバーハング角度90°と同等）ですべての造形サンプルに共通する部位である。

表面粗さについては、接触式の表面粗さ測定機（小坂製作所、DSF600S）を用いて、図1に示すオーバーハング部位である上部の上面と下面について平均表面粗さ（Ra）を3ライン測定し、平均値を算出した。測定は、送り速度0.2 mm/s、トレース長さ24 mm、カットオフ（ λc ）8 mm、評価長さはカットオフ×2で実施した。

3 実験結果及び考察

3-1 オーバーハング角度が及ぼす寸法精度への影響

図3に、種々のオーバーハング角度を付加させた造形サンプル（A配置）を示す。(a)は側面側から、(b)は上面側から、(c)は下面側から見た外観写真である。いずれのオーバーハング角度でも最後まで造形は完了したが、オーバーハング角度25°以下では、大きな変形が確認された。一方、B配置においては、オーバーハング角度が30°以下で大きな変形が認められた。

図4に、A、B配置における造形サンプルの幅と厚さの測定結果を示す。なお、変形の大きかった上部（A配置：25°以下、B配置：30°以下）の寸法測定は省略している。図4(a)-(d)より、オーバーハング部ではない下部において、幅および厚さの測定値は、設定値よりも大きな値を示した。これらは、表面に融着している未溶融粉末が存在し、それらも含めた測定によるものと考えられる。図4(a)(b)、または図4(c)(d)より、下部寸法において異なる配置による寸法の違いも認められた。測定面と粉末敷布方向（x方向）の関係が垂直関係である方が平行関係にあるよりも値が大きくなる傾向を示した。これより、少なからず粉末の敷布する方向の影響を受けていることが示唆される。

オーバーハング部位である上部においても幅方向では、同様な傾向を示しているが、厚さ方向では異なる傾

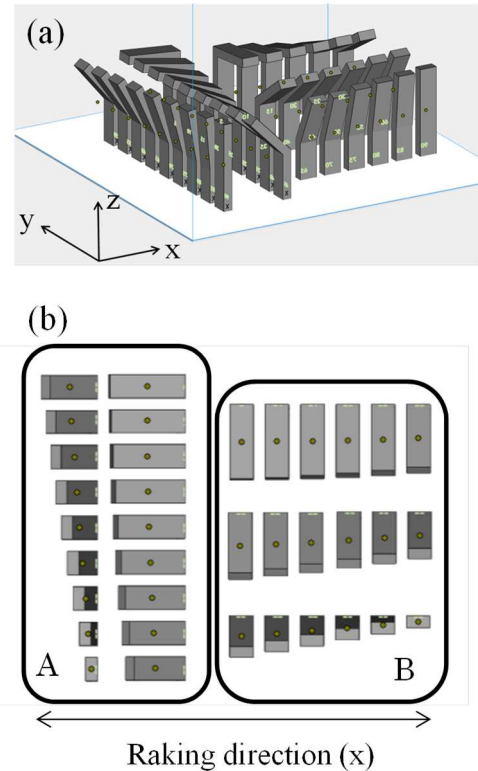


図2 造形モデル配置 (a) 投影図、(b) 上面

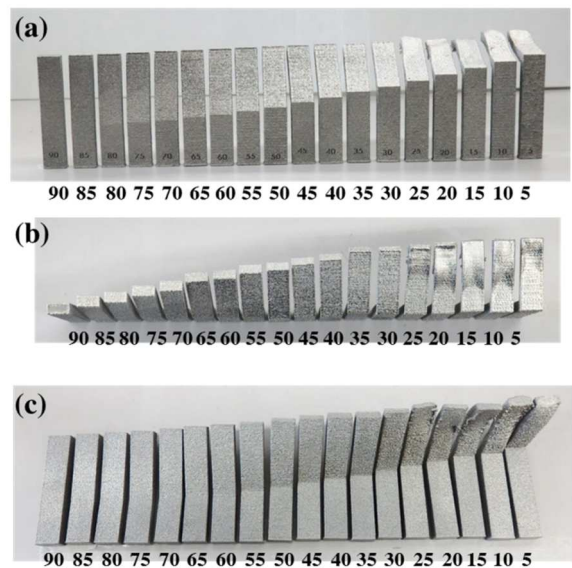


図3 A配置造形品の各方向から見た外観写真
(a) 側面側、(b) 上面側、(c) 下面側

向を示している。オーバーハング角度が小さくなるに伴い、徐々に値が増加し、オーバーハング角度55°よりも小さくなると急激に値の変動が生じている。この原因として2つ考えられる。一つは、厚さの測定面はオーバーハング部位であり、オーバーハング角度の低下により下面の粗面化が大きくなり、厚さが増加したためである。もう一つは、オーバーハング部位の厚さの精度は、オー

バーハング角度の低下に伴い、XY平面の寸法精度よりも精度が劣る積層方向（Z方向）の寸法精度が支配的になるためである。

3-2 オーバーハング角度が及ぼす表面粗さへの影響

図5にA、B配置における造形サンプルの上面、下面の平均表面粗さ（Ra）を示す。図5（a）、（b）より、いずれの配置においても、上面はオーバーハング角度が小さくなるに伴い、平均表面粗さも小さくなっていく傾向を

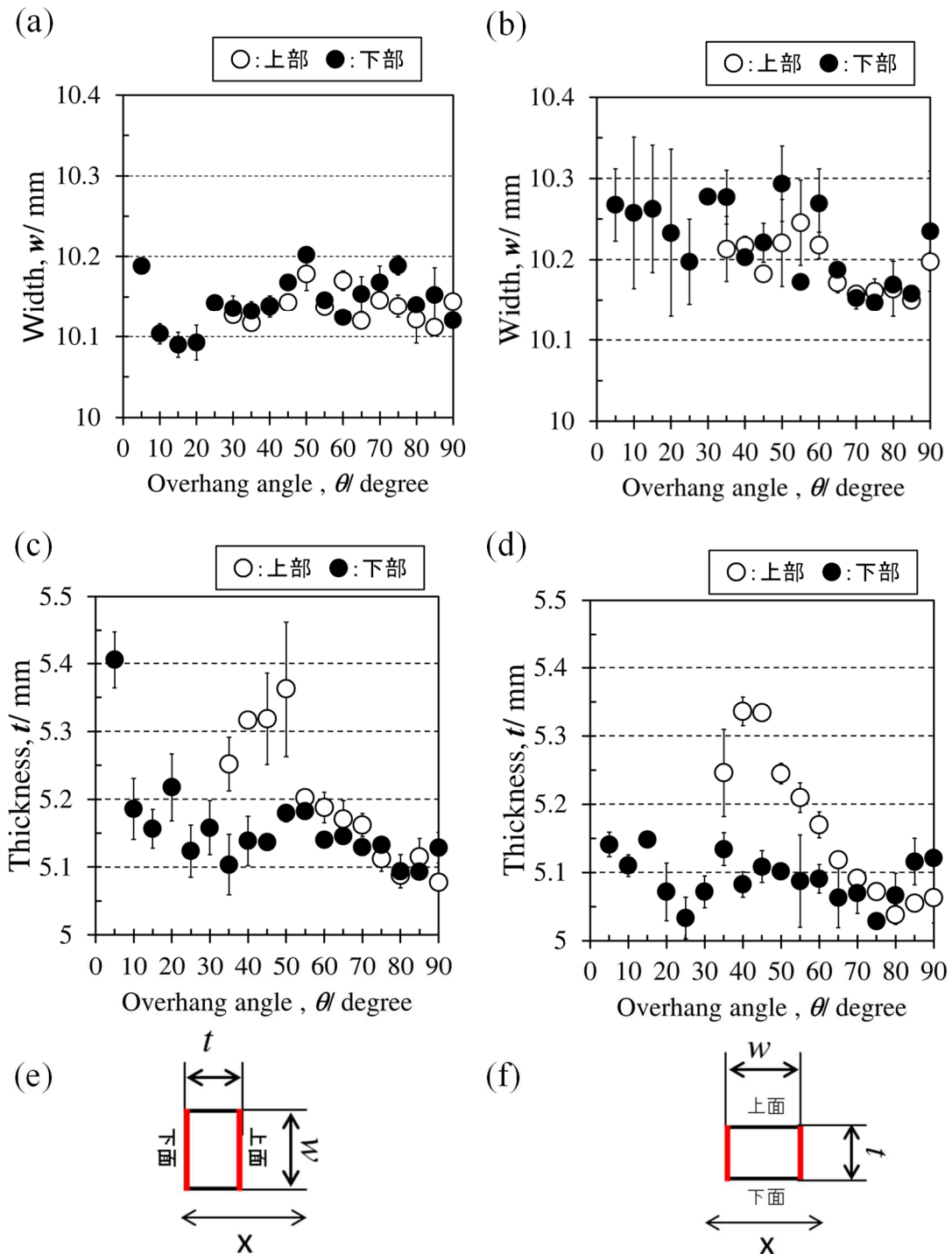


図4 造形品の寸法測定結果

(a) A配置サンプル 幅、(b) B配置サンプル 幅

(c) A配置サンプル 厚さ、(d) B配置サンプル 厚さ

(e) A配置サンプルと粉末敷布方向(x)の関係、(f) B配置サンプルと粉末敷布方向(x)の関係

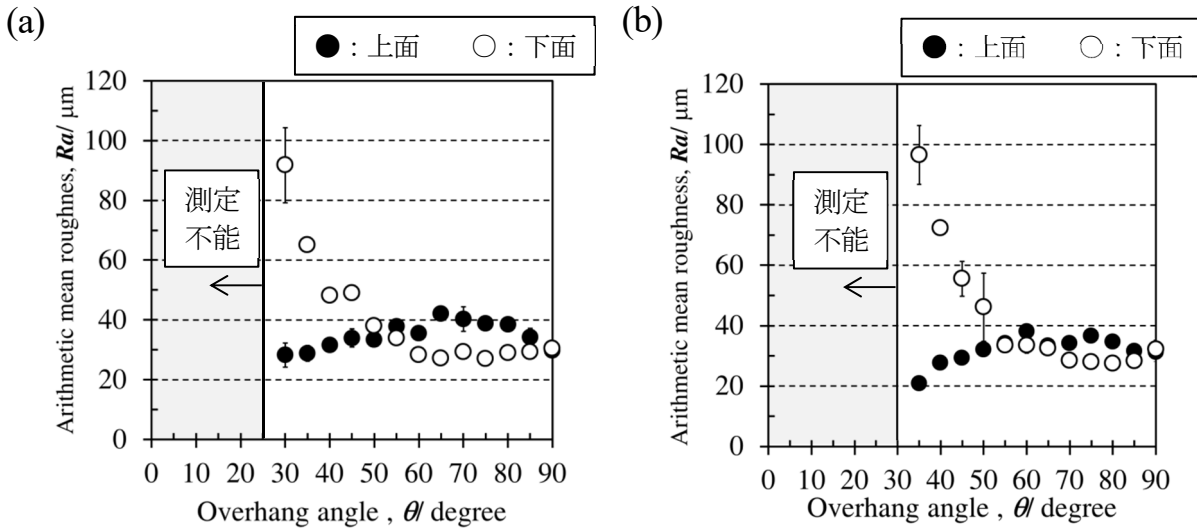


図5 造形品の平均表面粗さ (a) A配置サンプル (b) B配置サンプル

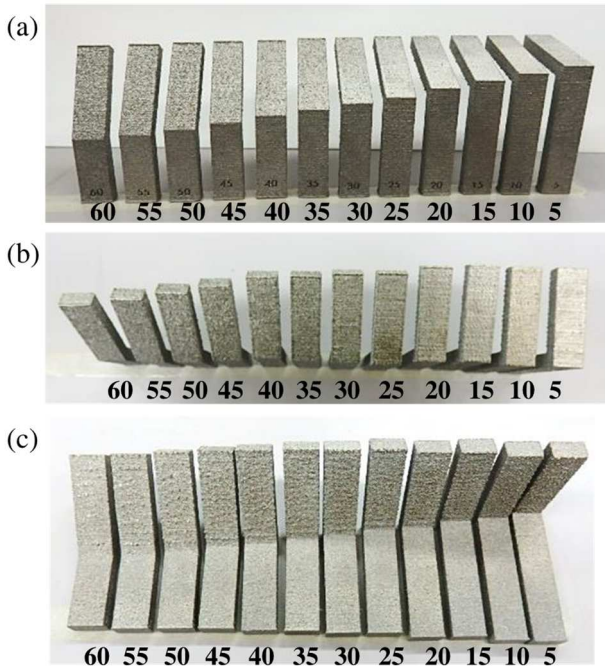


図6 A配置造形品(サポートあり)の各方向から見た外観写真
(a)側面側、(b)上面側、(c)下面側

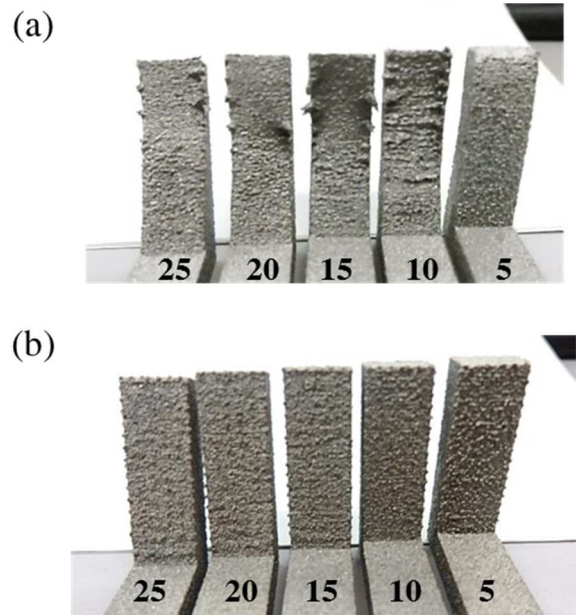


図7 A配置造形品の下面側の外観写真
(a)サポートなし、(b)サポートあり

示した。一方、下面においては、オーバーハング角度が 50° を境に挙動が大きく異なる。 50° より大きな領域では、平均表面粗さは上面と同等もしくは小さく、 $25\sim 40\mu\text{m}$ の値を示すが、 50° よりも小さくなると急激に増加する傾向を示した。またA配置では 25° 以下、B配置では 30° 以下は、大きな変形により測定不能であった。

図6にサポートを付加させたA配置造形サンプルの外観写真を示す。このサンプルはサポートを除去した後の外観写真である。また、図7にサポート付加なし造形サ

ンプルで大きな変形が確認されたオーバーハング角度 $5\sim 25^\circ$ の造形サンプルの比較写真を示す。サポートを付加させることにより、大きな変形も確認されず、健全な形状であることがわかる。

図8に、サポートの有無による造形サンプルのオーバーハング角度と平均表面粗さ(Ra)の関係を示す。サポートを付加させた場合は、 60° から 50° までは、サポートなし造形サンプルと同等の値を示しているが、 45° 以下の角度では、サポートなし造形サンプルよりも低い値

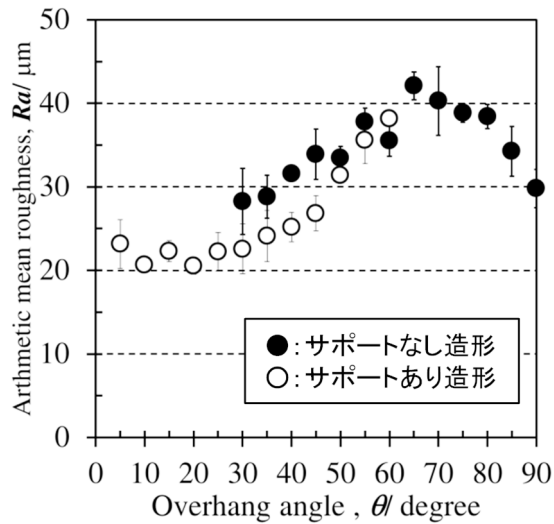


図8 サポートの有無による表面粗さ測定結果の比 (A配置 上面)

となり、表面粗さの改善効果が認められ、Ra 20~25 μm となった。

4 結 論

本研究では Ti-6Al-4V 合金粉末を用いて、電子ビーム金属積層造形法により種々のオーバーハング角度を有する造形体を作製し、オーバーハング角度が及ぼす造形品

質 (寸法精度、表面粗さ) への影響について調査した。以下に得られた知見を列記する。

- (1) サポートの無い状態で、オーバーハング角度 35° 以下の造形サンプルで大きな変形が認められた。
- (2) オーバーハング角度を付加させた造形サンプルにおける寸法 (幅、厚さ) は、オーバーハング角度が小さくなるに伴い、徐々に値が増加し、オーバーハング角度 55° よりも小さくなると急激に値が変化した。
- (3) オーバーハング部上面の表面粗さは、オーバーハング角度が小さくなるに伴い、小さくなっていく傾向を示した。
- (4) 一方、下面の表面粗さは、オーバーハング角度が 50° を境に挙動が大きく異なり、50° より大きな領域では、表面粗さは、上面と同等もしくは小さい値を示し、平均表面粗さ 25~40 μm であったが、50° よりも小さくなると急激に表面粗さが増加する傾向を示した。
- (5) サポートを付加させた造形サンプルの表面粗さは、オーバーハング角度 60° から 50° までは、サポートなし造形サンプルと同等の表面粗さを示し、45° 以下の角度では、表面粗さが改善され、平均表面粗さ 20~25 μm となった。