

金属粉末積層造形品の仕上げ加工における位置決め方法と削り代*

飯村 崇**、黒須 信吾**、生内 智**、和合 健**、池 浩之***

金属粉末積層造形装置は 3DCAD のデータを基に切削加工などでは作製不可能な複雑な形状を作製することが可能だが、形状精度や表面粗さの精密なコントロールが難しく、それらが必要な部分については切削加工などの仕上げ加工を行う必要がある。そこで、造形品の仕上げ加工における位置決め方法を検討した。金属粉末積層造形時の変形を考慮し、仕上げ加工は 3D デジタイザで測定した値を基に、CAD データを適正に修正する必要がある。特に、ベストフィットによる補正は削り残しを無くす上で有効である。また、造形時の変形と位置決め時の誤差を考慮すると削り代は 0.4 mm 以上必要である。

キーワード：金属粉末積層造形、仕上げ加工、位置決め方法、削り代、3D デジタイザ

Positioning Method and Cutting Margin for Finish Milling of Metallic Additive Manufacturing Products

HIMURA Takashi, KUROSU Shingo, OBONAI Tomo, WAGO Takeshi and IKE Hiroyuki

Key words : Metallic Additive Manufacturing, Finish Milling, Positioning Method, Cutting Margin, 3D-Digitizer

1 緒 言

近年、機械部品の作製に金属粉末積層造形装置を使用するケースがみられる。金属粉末積層造形装置は 3DCAD のデータを基に切削加工などでは作製不可能な複雑な形状を作製することが可能だが、金属粉末を $\phi 0.1$ mm 程度のスポット径を持つ電子ビームやレーザービームで熔融させて積み重ねていくため形状精度や表面粗さの精密なコントロールが難しく、それらが必要な部分については切削加工などの仕上げ加工を行う必要がある¹⁾。図 1 に金属積層造形品（以下、造形品と称する）の仕上げ加工を行う場合の手順を示す。仕上げに切削加工を行う場合、加工原点や傾きなどを決定するための基準面が必要となるが、造形品の場合、表面粗さが大きく、基準として使用できる面が存在しない。また、レーザー方式の場合、ベースプレートに造形品を積み上げていくため、ベースプレートの面を利用することが考えられるが、ベースプレートを金属粉末積層造形装置に取り付ける際に位置決め基準が無く、造形品との位置関係やベースプレートの Z 軸周りの回転などを正確に把握できないこと、レーザービームで熔融した際の熱によりベースプレートに反りが発生することなどから、そのままでは位置決め基準とすることができない。さらに、位置決め基準を正確にとら

えずに加工をすると、削り残しや削り過ぎが発生し、製品としての基準を満たさないケースも考えられる。

そこで、本研究では、図 1 赤枠に示す造形品の仕上げ加工における位置決め方法を検討し、それぞれの方法における加工後の表面状態（形状精度、けずり残しの有無など）の調査を行うと共に、削り過ぎ・削り残しを無くすために必要な削り代の調査を行った。

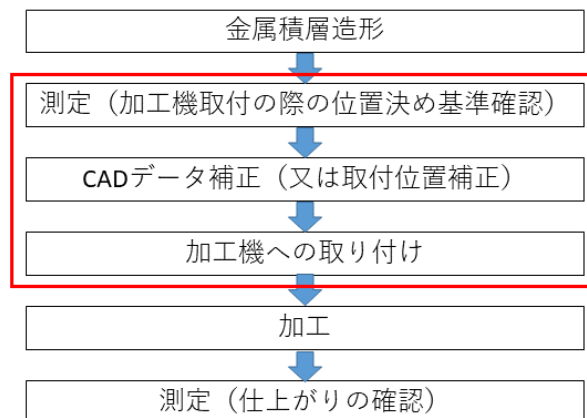


図 1 金属積層造形品の仕上げ加工の手順

* 中東北 3 県公設試技術連携推進事業(5 軸マシニングセンタによる金属積層造形品の仕上げ加工法の確立)

** 素形材プロセス技術部

*** 素形材プロセス技術部 (現：理事兼ものづくり技術統括部長)

2 実験方法

2-1 切削加工用試験片の作製

造形品の形状は、図 2 に示すインペラ形状で、レーザービーム方式の金属粉末積層造形装置 (TRAFAM 製) を使用して作製した。材質はマルエージング鋼で、積層条件は、積層ピッチ 0.1 mm、間隔 0.1 mm とした。

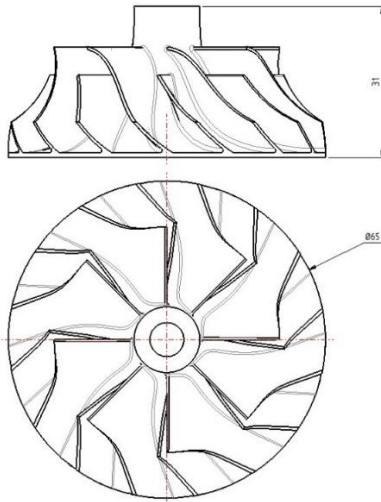


図 2 造形品の形状

造形品は 350×150×30 mm のベースプレート上に 2 個造形し、造形終了後にベースプレートをワイヤ放電加工機で切断し、100×100×30 mm のベースプレート上にインペラ形状の造形品がある切削加工用試験片を 2 セット作製した。試験片をマシニングセンタに固定する際は、ベースプレート部をバイスで把持した。

2-2 切削加工用試験片の測定と加工基準

通常、試験片の位置決めは、基準面を加工機の測定プローブで測定して行う。しかし、表面粗さが Rz100 μm (0.1 mm) 程度の造形品の場合、測定プローブによる測定ではプローブを当てる位置によって 0.1 mm 以上の誤差を生じる可能性がある。そのため今回の加工対象に関しては、ワイヤ放電加工機で切断したベースプレートの切断面と造形品との位置関係をあらかじめ正確に把握したうえで、加工機上ではベースプレートの切断面を使用し、測定プローブによる測定で位置決めした。造形品とベースプレートの切断面との位置関係の把握には測定器を使用するが、3次元測定機のようにプローブ接触による測定では、加工機の測定プローブと同様に造形品表面の凹凸の情報を十分に得ることができず誤差が生じやすくなるため、今回の測定には適さない。一方、一度に多くの点について測定が可能な方法として 3次元デジタルマイザがある。3次元デジタルマイザは 0.1 mm ピッチ程度の間隔で、多くの測定点が得られることから、最小二乗法を用いて基準面や円筒・円錐などを求めることができ、造形品の表面の凹凸を無視した本来の位置を知ることが可能である。そこで、3次元デジタルマイザ (COMET6 Carl Zeiss

社(表 1)) を使用して、造形品の形状とベースプレートとの切断面を測定し、位置関係を正確に把握した。測定結果の一例を図 3 に示す。

表 1 Carl Zeiss 社 COMET6 仕様

測定器名 : COMET6-16M
測定点数 : 約 1,600 万画素 (4,896 × 3,264)
測定範囲 (X × Y × Z) : 274 × 193 × 160 mm
測定点間距離 : 0.056 mm
測定精度 (1 ショット) : ±0.012 mm

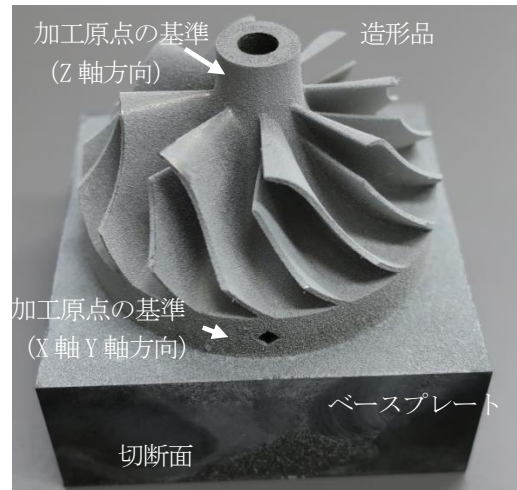


図 3 切削加工用試験片

試験片の加工を行う場合、加工機への固定に必要な要素として、X 軸、Y 軸、Z 軸方向の加工原点と Z 軸周りの回転角がある。加工原点の X 軸、Y 軸方向成分については外周部の円筒を使用し、ベースプレートの切断面からの距離を求めた。加工原点の Z 軸方向成分についてはインペラ形状の一番上にあるシャフト部分の上面を使用し、ベースプレートの試験片に近い部分との距離を求めた。Z 軸周りの回転角については、羽根上部の直線部分を用いて直線を 2 本引き、それらの中間の直線を造形品の基準軸とした。加工機で参照できるのはベースプレートの切断面であることから、切断面と造形品の基準軸がなす角度を求めた。このようにして求めた加工原点と基準軸の回転角を基に CAD データを造形品の中心に移動・回転させたデータを、加工機の基準や CAM による加工プログラム作成に使用した。

2-3 5 軸マシニングセンタによる切削加工

2-2 の測定結果を基に、CAD データの修正と試験片の位置決めを行い、5 軸マシニングセンタ (DMG 社製 HSC55linear) による加工を行う。試験片をバイスに固定した後、試験片のベースプレート切断面を使用して角度の修正と X、Y 軸方向の原点の決定を、ベースプレート上の試験片近傍をベースに Z 軸方向の原点の決定を行った。

加工は 2 個の試験片 A、B を利用し 3 回行った。試験片 A は羽部分のみ +0.3 mm オフセットした形状 (図 4)、

試験片 B は羽部分のオフセット量を 90 度ずつ変えた形状である。オフセット量は 0.2、0.3、0.4、0.5 mm である (図 5)。

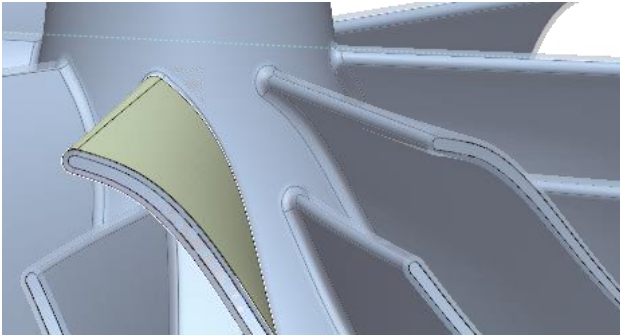
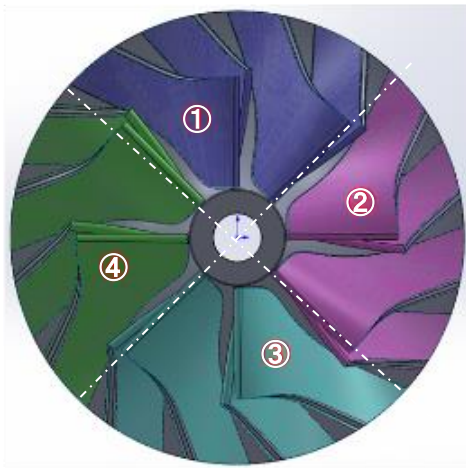


図 4 切削加工用試験片 A の羽部分のみを 0.3 mm オフセット



面オフセット量(mm) ①0.2、②0.3、③0.4、④0.5

図 5 切削加工用試験片 B のオフセット量

① 加工 1 : 試験片 A の 180 度分を加工。うち、90 度は CAD データどおりの形状を、残り 90 度は羽根の部分から +0.4 mm 離れた表面を加工するデータを使用した。+0.4 mm 離れたところを加工する場合、加工代が +0.3 mm の試験片では切り込み量が -0.1 mm となるため、本来であれば加工されないが、位置決めや形状の精度が 0.1 mm よりも悪くなった場合にのみ加工されるため、形状の 0.1 mm 以上のずれを評価する指標とした。

② 加工 2 : 試験片 A のうち、①で加工しなかった残りの 180 度に対し、①の状態から、COMET6 の測定データを基にベストフィット位置決め (CAD データと測定値のズレが最小となるように、測定結果を移動させる処理のこと。) をかけた CAD データを使用して加工を行った。①と同様に 90 度は CAD データどおり、残り 90 度は元の CAD データから +0.4 mm オフセットした面を用いて作成したツールパスで加工を行った。

③ 加工 3 : 試験片 B を CAD データどおりに加工したもの。CAD データにはベストフィット位置決めを反映したデータを使用した。

加工条件を、表 1 に示す^{2),3)}。加工は 5 軸面沿い加工を使用した。ツールパスの作成は、CAM ソフト TopSolid7 を使用して行った。はじめに 3 軸の面沿い加工でツールパスを作成して、そのツールパスを 5 軸加工に変換した。次に、羽根と羽根の隙間に工具が入るように、工具を進行方向に垂直な面上で、加工物に垂直な状態から 80 度傾けた状態で加工を行うよう設定を行った。

表 2 加工条件

項目	条件値
使用工具	ボールエンドミル R0.75 MRB230R0.75×16 (d4) 日進工具
加工速度	60 m/min (12732 rpm)
送り速度	0.02 mm/tooth (509 mm/min)
切込量	0.1 mm
ピッチ	0.04 mm

3 実験結果・考察

3-1 作製した試験片と加工結果



図 6 金属粉末積層造形装置で造形したインペラの表面

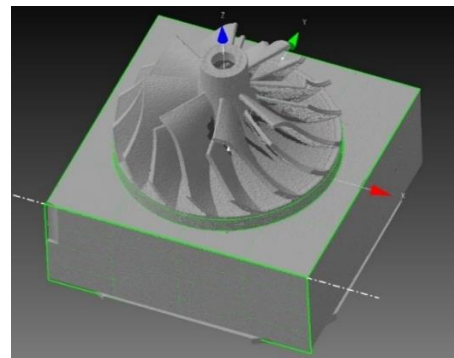


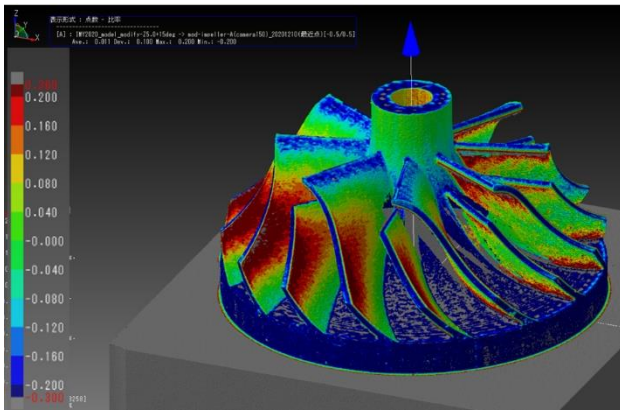
図 7 切削加工用試験片を 3 次元デジタル計測機で測定した形状

金属粉末積層造形装置により造形したインペラの表面の様子を図 6 に示す。これより、造形品特有の凹凸が観察される。図 7 は切削加工用試験片 A を 3 次元デジタル計測機 (COMET6) で測定した結果で、灰色の部分は測定した点を表示したものである。造形物 (インペラ) とベースプレートの形状が、測定データによって再現されていることがわかる。この測定データを用いて、加工機での位置決めに必要なベースプレートと造形品の位置関係を求

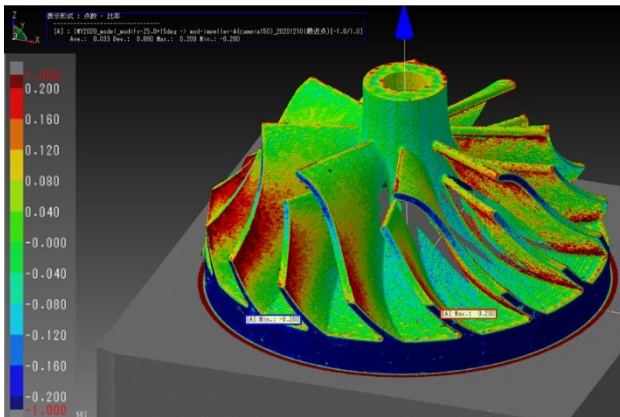
めた。また、試験片 A、B のベストフィット位置決め移動量は、それぞれ表 3 のとおりである。参考までに、試験片 A においてベストフィット位置決めした場合としない場合の測定結果を図 8 に示す。

表 3 ベストフィット位置決め移動量

	回転角度	Z 軸方向の移動量
試験片 A	0.507°	-0.262
試験片 B	-0.421°	-0.185



ベストフィット位置決め無し



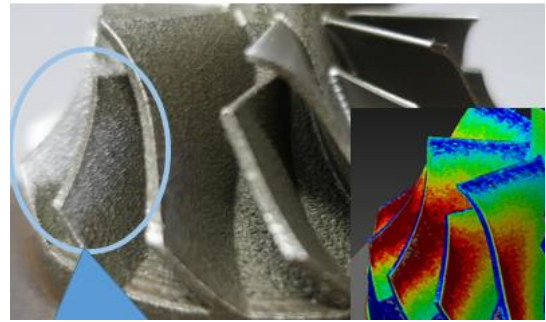
ベストフィット位置決め有

図 8 位置決めの方法と測定結果

測定結果を基に試験片を 5 軸マシニングセンタ (DMG 森精機 HSC-551linear) に取り付けて切削加工を行った。加工した結果および試験片を COMET6 にて測定した結果について述べる。加工 1 (試験片 A、通常的位置決めのみ) では、羽根の先端部分に、面沿い加工の方向とは異なる模様がある (図 9a)。羽根の端部は刃が十分に当たらず、積層の跡が残っていることから、取り代が不十分であることがわかる。製品寸法+0.4 mm の部分を加工した結果については、測定結果に見られる赤い部分 (測定結果がプラスになっている部分) のみが削れており (図 9b)、測定結果と実際の加工の間で相関が取れていることが確認できた。全体的に Z 軸方向の縮小がみられることから、積層の際に Z 軸方向に+0.3 mm よりも厚く肉盛りをする必要があることがわかった。



a) 端面の削り残し



実加工部分

測定結果

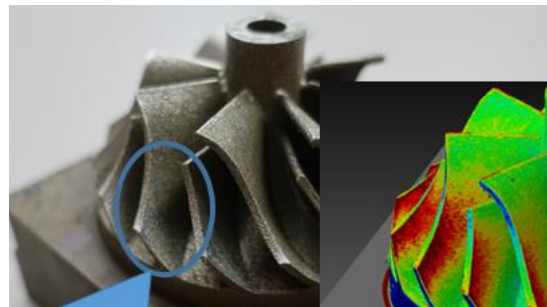
b) 測定結果と加工された部分の比較

図 9 切削加工用試験片 A を通常的位置決めのみで加工 (加工 1) した結果

3-2 ベストフィット位置決め、オフセットの段階的調整による加工精度への影響



a) 羽根全面が加工されている



実加工部分

測定結果

b) 測定結果と加工された部分の比較

図 10 切削加工用試験片 A をベストフィット位置決め有で加工 (加工 2) した結果

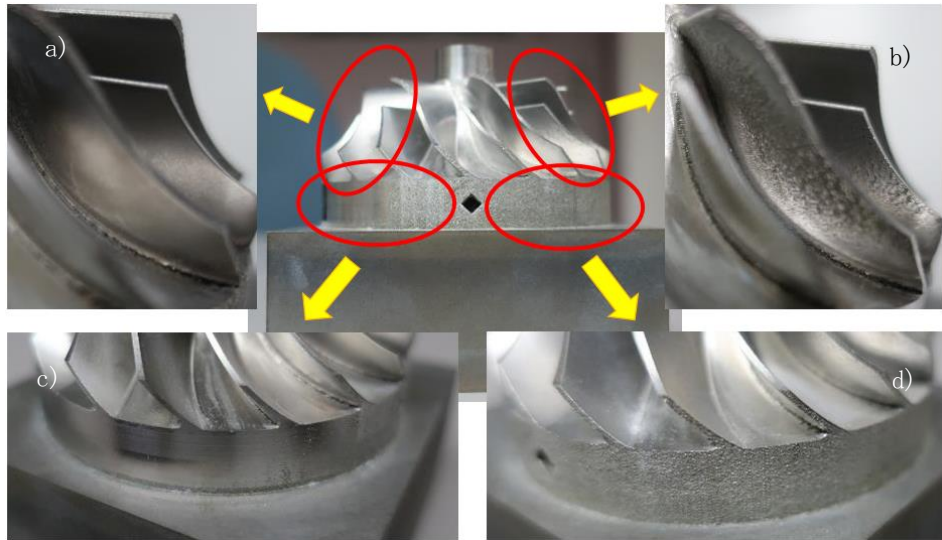


図 11 切削加工用試験片 B (オフセット量を変化させた) をベストフィット位置決め有で加工 (加工 3) した結果

次にベストフィット位置決めおよびベストフィット位置決めとオフセットを段階的に変化させた場合の加工精度への影響について述べる。はじめに試験片 A をベストフィット位置決め有で加工した結果について述べる。図 10 に測定結果を示す。羽根の部分はベストフィット位置決めによって、全面削り残しが無い状態となったが、付け根部分はけずり残しがみられることから (図 10a)、ベストフィット位置決めでずらした 0.29 mm 以上に、Z 軸方向に収縮があると考えられる。製品寸法+0.4 mm の部分については、測定結果に見られる赤い部分 (測定結果がプラスになっている部分) のみが削られており (図 10b)、加工 1 と同様に測定結果と実際の加工の間で相関が取れていることが確認できた。

試験片 B でベストフィット位置決め有とオフセットを段階的に変化させた結果を図 11 に示す。外周部左側は全面加工されているのに対し (図 11c)、右側には加工されていない部分がある (図 11d)。これは、COMET6 にて外周部を測定し X 軸方向および Y 軸方向の中心を定めた際に、表面の凹凸の影響で中心がずれてしまったことが原因と考えられる。削り代 0.4、0.5 mm の羽根は削り残しが無いのに対し (図 11a)、削り代 0.2、0.3 mm の羽根は裏面に削り残しがある (図 11b)。積層時に Z 軸のマイナス方向に変形した試験片を、デジタイジング装置の測定値を基に Z 軸方向に -0.18 mm 移動させた。これにより、Z 軸のマイナス方向にあまり変形していない、積層面に対し垂直に近い部分の、マイナス側の削り代が減少してしまった。その結果、もともと削り代が少ない、削り代 0.2 mm、0.3 mm の羽根の裏側において、削り残しが発生したものと考えられる。このことから、けずり残しを防ぐには 0.4 mm 以上の削り代が必要である。シャフト部分は全面削り残しが無い。Z 軸のマイナス方向へのオフセットによりシャフト部分の削り代が大きくなっていることから、削り残しがなくなったと考えられる。

加工した試験片 B の形状誤差は ± 0.2 mm である。加工後の試験片 B を 3D デジタイザにて測定したところ、羽根の端部近傍で、かつ形状が平面に近い部分に形状精度が悪い部分が集中している。これは加工負荷による羽根の変形が原因であると考えられる。羽根の変形は、一度に全面的加工を進めるのではなく、羽根を 2~3 の部分に分け、端から順に加工していく事や、加工条件を緩くすることで、抑制可能であると考えられる。

4 結 言

金属粉末積層造形品の 5 軸マシニングセンタを用いた切削による仕上げ加工について検討し、位置決め方法と削り代について以下の結論が得られた。

(1) 位置決め方法

金属粉末積層造形時の変形を考慮し、仕上げ加工は 3D デジタイザで測定した値を基に、CAD データを適正に修正する必要がある。特に、ベストフィット位置決めによる補正は削り残しを無くす上で有効である。

(2) 削り代

造形時の変形と位置決め時の誤差を考慮し 0.4 mm 以上の削り代が必要である。

文 献

- 1) 原宣宏, 大西峻太ほか: レーザ溶融積層造形チタン材の仕上げ加工に関する研究, 2019 年度精密工学会春季大会学術貢献会講演論文集, p509-510
- 2) 上田隆司, Abdullah YASSIN ほか: 金属粉末光造形複合加工における小径ボールエンドミルの切削性能, 砥粒加工学会誌, 52, p718-723 (2008)
- 3) 日比野航, 酒井克彦ほか: SLM 法による SUS420J2 造形体の積層高さによる切削特性の変化, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p424-42