

金属積層工法によるターボチャージャ試作のリードタイム短縮

Rapid Prototyping of Turbocharger Turbine Housings by Powder Bed Fusion Additive Manufacturing



ターボチャージャ部品の積層造形中の写真

瀧田 篤史*¹
Atsushi Takita

新沢 慶介*²
Keisuke Shinzawa

小椋 謙*³
Yuzuru Ogura

急激なターボチャージャ需要の高まりに伴って受注拡大には開発サイクルの短期間化及びお客様への試作品提供の短納期化が重要となっている。ターボチャージャ部品の中でもコンプレッサカバー(C/C)及びタービンハウジング(T/H)は車種毎に取り合いインターフェース形状が変わる上、鋳造で製作しているため、製造リードタイムが長い。そこで、鋳型が不要でリードタイム短縮が期待できる金属積層工法のC/C及びT/Hの製造への適用を検討した。適用においては、重工技報 Vol.55 No.2で紹介した金属積層工法に関する要素技術を活用するとともに、C/C及びT/H試作に特有の課題である、鋳造材料における造形条件の設定、造形材の機械特性の評価、内部流路の形状評価、ターボチャージャとしての性能評価に取り組み、ターボチャージャ試作のリードタイムを3分の1以下に短縮することに成功した。

1. はじめに

燃費性能の向上や排ガスの抑制へつながることから、ターボチャージャの需要が伸びており、当社では、受注拡大に向けて開発リードタイムを短縮し、お客様のニーズへの迅速な対応に取り組んでいる。ターボチャージャの試作においては、コンプレッサカバー(C/C)及びタービンハウジング(T/H)の試作は、車種毎に取り合い形状が変わる上に、鋳造で製作しているために製作に日数を要するため、これら部品の試作期間の短縮が重要な課題となっている。

金属積層工法は鋳型を製作することなく、3Dモデルから直接、部品を製造できるため、鋳造部品の試作に対し、納期短縮が期待できる。そこで、当社ではC/C及びT/Hを金属積層工法で試作し、鋳造で1ヶ月程度を要する製造期間を短縮するプロセス確立に取り組んだ。

金属積層工法の適用においては、対象とする材料、部品寸法、装置の操作性等を考慮して、レーザ方式の粉末ベッド方式3Dプリンタを採用することとした。C/C及びT/Hの試作に金属積層工法の適用する際の課題として、1)鋳造材料の原料粉末選定、2)1)で選定した原料粉末に対する積層造形条件設定、3)試作部品の内部流路の形状評価、に取り組んだ。本報ではT/Hの結果を中心に報告する。図1に試作フローを示す。

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株) 生産本部 製造部

*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株) 生産本部 製造部 工博

*3 三菱重工工業(株) 総合研究所 サービス技術部 主席研究員 工博

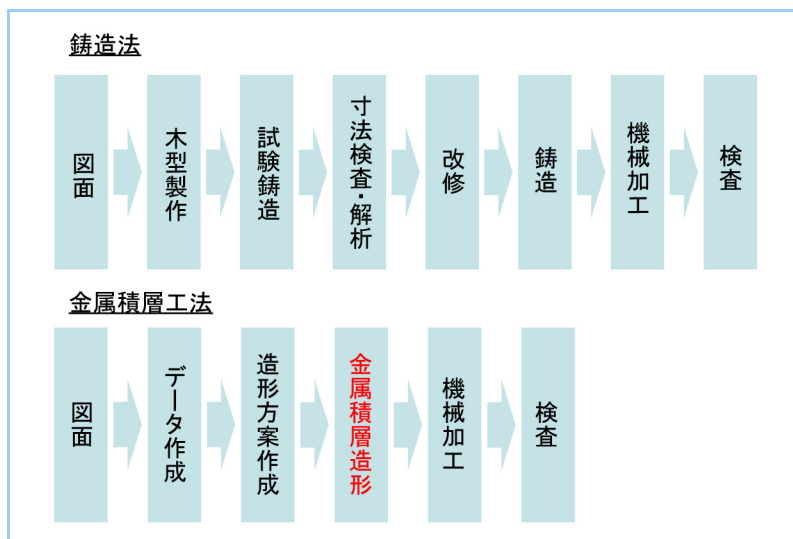


図1 鑄造法と金属積層工法の試作フロー

2. 粉末原料選定

ターボチャージャ部品製造に用いられる鑄造材料は、金属積層工法用原料粉末として販売されていないため、新たに準備する必要がある。粉末ベッド方式の金属積層工法では、原料粉末を数十 μm の厚さに一様に敷設することが必要であるため、優れた流動性が求められる。一般的にはガスアトマイズ法で製造された球形の10~45 μm 程度の原料粉末が用いられることから、鑄造材料と同組成の原料粉末を作製し、分級処理を行った。試作した4種の金属粉末は、①電子顕微鏡による形状観察、②レーザ回折法による粒径分布計測、③オリフィスからの流出時間による流動性評価に基づき選定した。表1に4種の原料粉末の電子顕微鏡写真、粒径分布、及び、 $\phi 3.15\text{mm}$ のオリフィスから50gの粉末が流出するのに要した時間を示す。電子顕微鏡写真により各サンプルとも球状の粉末であることが確認できたが、粒径分布の測定結果から粉末Aは70 μm 以上の粒子が、粉末Bは10 μm 以下の粒子が含まれることから共に除外した。さらに流動性の評価結果から、流動性が最も優れる粉末Dを金属積層工法に使用する原料粉末に選定した。

表1 原料粉末の粒子形状、粒径分布、流動性の比較

	粉末A	粉末B	粉末C	粉末D
電子顕微鏡写真				
粒径分布				
$\phi 3.15$ のオリフィスからの粉末50gの流出時間 (s)	10.0s	11.0s	11.3s	10.8s

3. 造形条件設定

金属積層工法においては原料粉末はレーザーで熔融後、急冷されるため、鑄造材では亀裂の発生が懸念される。また、原料粉末を積層造形するためには、レーザー照射時の溶け込み深さを適正に制御する必要がある。そこで、板材に金属積層工法で使用するレーザー(Yb ファ이버レーザー、波長 1060nm、ビーム径 0.1mm)を照射し、亀裂の発生しない照射条件を求めた。次に、原料粉末を用いて、粉末の積層、レーザー照射を繰り返し、積層により造形ができる条件を絞り込むことにした。最後に抽出した複数条件についてブロック造形を行い、ブロックの充填率、形状から適正な造形条件を決定し、T/H に要求される引っ張り強度、0.2%耐力、伸びの評価を行った。

3.1 板材への照射試験

亀裂の発生しないレーザー照射条件(レーザー出力、走査速度)の範囲を明らかにするため、4水準のレーザー出力、走査速度で板材にレーザーを照射し、照射痕を実体顕微鏡で観察し、亀裂の有無、ビード幅を評価した。図2に横軸をレーザー出力、縦軸を走査速度として、照射痕の評価結果を示す。レーザー出力が大きく、走査速度が小さい条件では亀裂が発生し、逆にレーザー出力が小さく、走査速度が大きい領域では亀裂の発生はないが、熔融領域が小さく、熔融不良が懸念されるため、その中間を適切なレーザー照射条件の範囲と判断し、積層造形試験の試験条件として7条件を選定した(図2中に①～⑦で表示)。

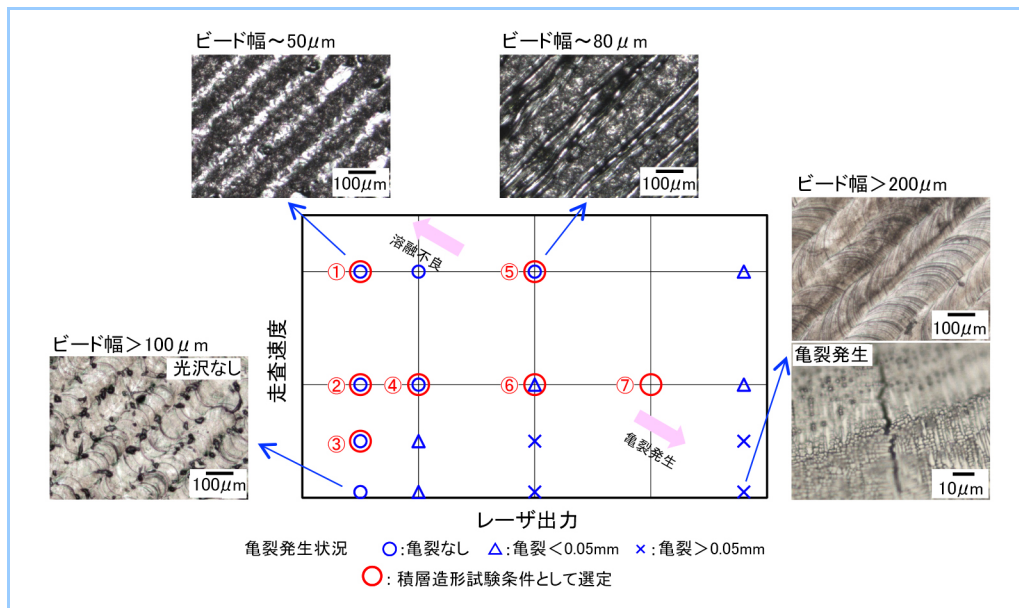


図2 鑄造材へのレーザー照射後の表面性状

3.2 積層造形試験

金属積層工法では、数十 μm 積層した原料粉末にレーザーを照射し、下地との溶け込みを確保しつつ、造形を進めていく。そこで、原料粉末の積層、レーザー照射を 10 回繰り返し、積層造形の可否を確認する試験を行った。先の板材への照射試験結果から選定した7条件でレーザー照射を繰り返し、壁を造形する試験に加えて、レーザーによるハッチングを行い、10mm \square のスラブを造形する試験も行った。なお、ハッチング間隔は板材へのレーザー照射で形成されたビード幅を元に設定した。

試験で得られた壁とブロックの代表的な形状を図3に示す。条件①では原料粉末が下地と融合せず、ブロック、壁ともに造形できなかった。条件⑦では壁は造形されたが、ブロック造形時に黒い煤状の粉末が生成されたため、これら2つの条件は除外し、条件②～条件⑥の5条件を選定した。

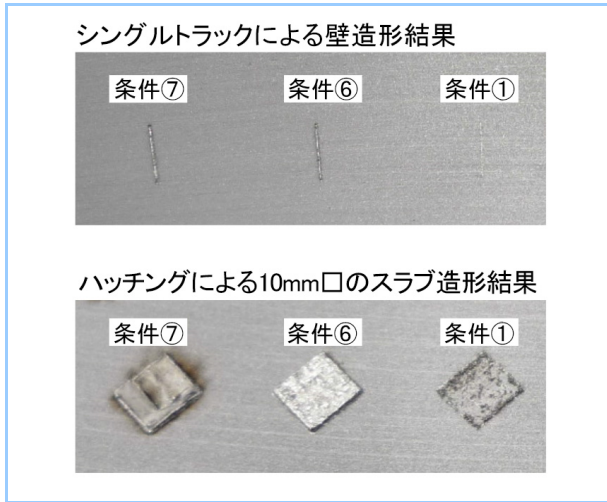


図3 積層造形試験結果(10層積層造形)
 壁は造形できるが、スラブには黒い煤状物質が付着:条件⑦
 金属光沢を有する壁・スラブ形成:条件⑥
 壁・スラブとも造形されず:条件①

3.3 ブロック造形

レーザ出力と走査速度の組み合わせ条件6条件で1辺 10mm の立方体を造形し、充填率を評価した。ブロック断面の光学顕微鏡写真を画像処理し、算出した空隙部の面積から充填率を求めた。評価の結果を図4に示す。レーザ出力が低い造形条件②, ③, ④では、気孔が残留し、充填率が低下する傾向が見られた。条件⑤, ⑥で作製したブロックは充填率が 100%に近い値を示し、造形したブロックに微細な亀裂が認められなかったことから、この2条件で機械特性評価用のブロックを作製することとした。

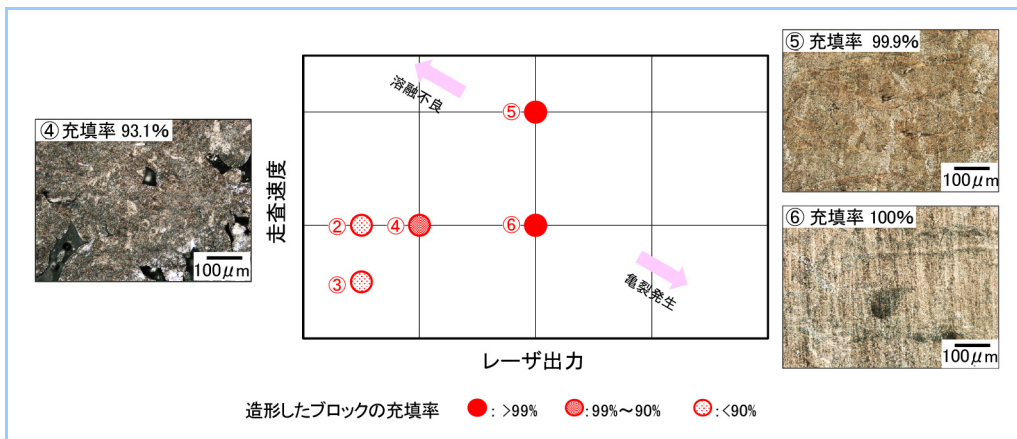


図4 造形したブロックの充填率と造形条件の関係

機械特性の評価用試験片を作製するため、30mm×30mm×10mm のブロックを条件⑤, ⑥で作製し、放電加工により積層方向と積層面内を引っ張り方向とする微小サイズの板状引っ張り試験片を切り出した。引っ張り試験機を用いてひずみ-応力曲線を取得し、引張強度, 0.2%耐力, 伸びを求めた。取得した機械特性を図5に示す。2条件で作製した試験片とも積層面内の引張強度, 0.2%耐力, 伸びが積層方向よりも大きい傾向を示したが、いずれも T/H に要求される機械特性を満足することが確認できた。

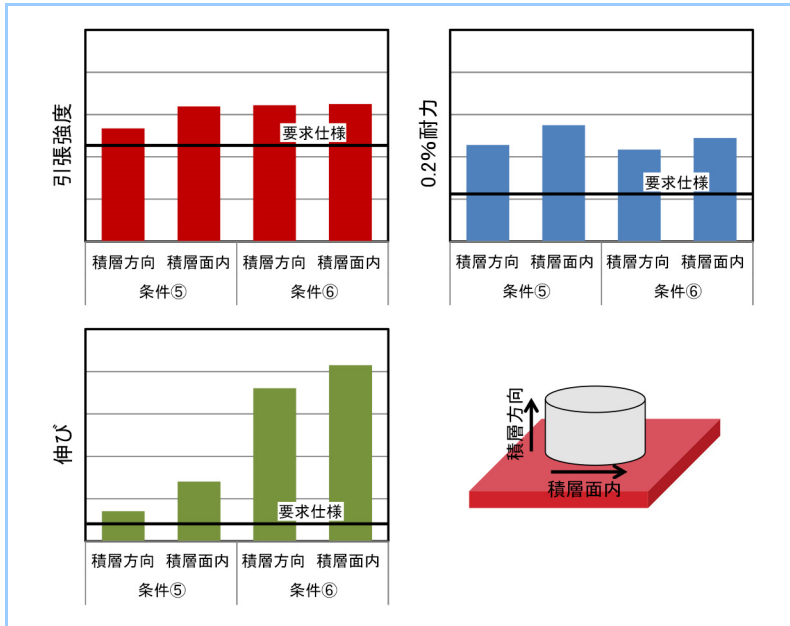


図5 設定した造形条件⑤, ⑥で作製したブロックの機械特性

4. 形状評価

T/H, C/C においては内部流路形状がターボチャージャに性能を左右するため、その形状評価は重要である。また、試作のリードタイムを短縮する上では、検査工程の短縮も求められており、非破壊で短時間に計測が可能な高出力のマイクロフォーカスX線 CT による内部流路形状の評価を試みた。特にアルミニウム合金製の C/C に比べ、X線の透過率が低く、より評価が難しい鉄系材料の T/H で内部流路の評価を行い、X線 CT の適用性を確認することとした。

形状評価は、鋳造品の T/H で内部形状をX線 CT で測定し、造形に使用した 3D モデルとの比較から内部流路の寸法誤差を求めた後、金属積層工法で作製した T/H の形状を測定し、同様に造形に使用した 3D モデルとの比較を行った。金属積層工法で作製した T/H の寸法誤差は図6に示すように、鋳造品の寸法誤差と同程度であることが確認できた。

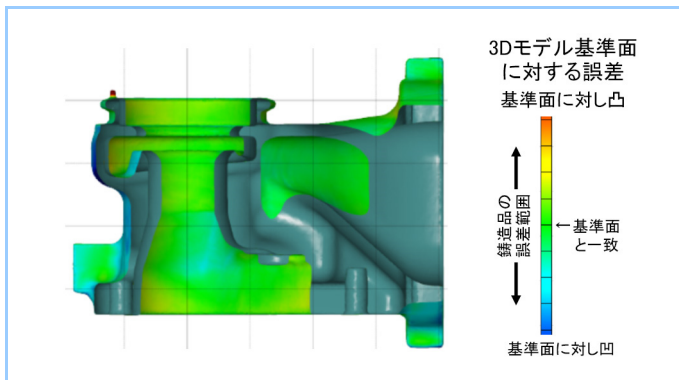


図6 金属積層工法で作製したタービンハウジングのX線 CT による内面形状計測

結果 タービン軸に沿った断面を表示, 3D モデル基準面に対する誤差をカラー表示

5. まとめ

金属積層工法をT/Hの試作に適用するに当たり、原料粉末選定、亀裂、気孔のない積層造形材を得るための造形条件抽出、造形材の機械特性評価を行い、金属積層工法で鋳造材と同等の材質が得られることを実証した。また、金属積層工法で作製した T/H の形状をマイクロフォーカスX線 CT で評価できることを確認すると同時に、鋳造品と同程度の寸法誤差であることを確認し

た。金属積層工法の適用により、試作リードタイムは図7に示す通り、従来の鋳造法と比較し3分の1以下に大幅に短縮可能であることが確認された。今後の取り組みとして、全世界のどの拠点においても同じ品質の試作品が製造できるように、金属積層工法を高度化するとともに、試作品加工データをデジタル送信し、お客様の近くで製作すること(デジタル輸送)により輸送時間の短縮に取り組んでいきたい。

これらの取り組みにより、さらなる試作品の迅速な提供や開発期間の短縮を通じて、お客様ニーズに合った製品開発に貢献していく所存である。



図7 鋳造法及び金属積層工法によりタービンハウジングを試作するプロセスのリードタイムの比較
各工程には標準的な待ち時間も含まれる。(機械加工および検査は、鋳造法と同じ工法のために省略)