

アディティブマニュファクチャリングを用いた スターリングエンジン熱交換器製作手法の紹介

Introduction of Heat Exchanger Production Technique for Stirling Engine
Using Additive Manufacturing

浅 沼 雅 彦*
Masahiko ASANUMA

遠 藤 恒 雄*
Tsuneo ENDO

酒 井 仁 史**
Hitoshi SAKAI

要 旨

従来の小型スターリングエンジンを超える性能を有するスターリングエンジンを開発するに当たり、内部に薄肉のフィンを持ったケースを試作した。ケース内部に配置されるピストンはこのフィンを避けるために放射状の溝が切られており、運転中のピストンとフィンの接触を防ぐために高い精度が要求される。

これらを満たす製作手法は従来なく、金属材料のためのアディティブマニュファクチャリングいわゆる 3D プリントを使って初めて実現できるものである。しかし既存のアディティブマニュファクチャリングそのまの技術では要求される仕様を満たせない箇所も多く、そのため種々の製作プロセス上のノウハウが必要となった。

粉末を積層するブレードの選択、造形後に除去する補強リング、熱処理前に内部に残った粉末除去のための小穴の加工等がノウハウとして得られた。また長さが短ければ 0.5 mm の板厚であっても造形できることがわかった。

ABSTRACT

A prototype case with thin internal fins was created in the development of a Stirling engine with performance that exceeds that of conventional compact Stirling engines. Radial grooves are cut into the pistons located inside the case in order to avoid these fins, and high accuracy is called for to help prevent contact between the pistons and fins during operation.

Since conventional manufacturing processes are unable to satisfy these specifications, precise manufacturing was realized for the first time through additive manufacturing, that is to say, the use of a 3D printer for metal materials. However, there are also many locations where the needed specifications cannot be satisfied simply by existing additive manufacturing technology, so various manufacturing process know-how was needed.

Selection of the blade used to laminate the powder, use of reinforcing rings that are removed after molding, machining of small holes to remove powder remaining inside the structure before heat treatment, and other techniques were obtained as know-how. In addition, it was found that given sufficiently short length, molding can be performed even with a plate thickness of 0.5 mm.

1. まえがき

目標比出力質量 10 kg 当たり 1 kW という小型軽量な高性能スターリングエンジンを開発するに当たり、伝熱能力を高めるためにシリンダ内部に薄型の放射状フィンを持ったケースを試作した。ケース内部に配置されるピストンはこのフィンを避けるために放射状の細い溝が切られており、フィンとの隙間は最小にしつつ運転中の接触を防ぐために高い形状精度が要求される。さらに部品点数を抑えて

軽量化するために、作動ガスが行き来する高温側、低温側の熱交換器部分および冷却水経路も一体化された多機能集約構造である。また高性能を保ったまま熱交換器を小型にするために、熱交換器はミリ単位の隙間が複雑に構成された微細形状である。これらを満たすような製作手法は従来にはなく、金属材料のためのアディティブマニュファクチャリング (以下、AM) いわゆる 3D プリントを使って初めて実現できるものである。

最近時積層による 3D 成型の技術の進歩は目覚しいが、

* 四輪 R&D センター

** 株式会社 NTT データエンジニアリングシステムズ

一般的には鋳造や機械加工等の既存の製法で作られた形状をそのまま積層による製法に置き換えることが主流である(1)-(3)。

今回は初めに製法の特徴を調べた上で3D技術でしか作れない形状で最適性能が得られるように設計を行った。しかし実際に製作してみると既存のアディティブマニュファクチャリングそのまの技術では要求される仕様を満たせない箇所も多く、そのため種々の製作プロセス上のノウハウが必要となった。

そのノウハウの例としては、熱収縮による形状精度の低下を防ぐために全てを薄肉で構成し厚さの変化を極力減らす形状とすること、成型後に機械加工等で除去するサポート形状に工夫を凝らすことで積層中の歪を生じさせないことなどが挙げられる。それら試行錯誤の末に得られた製作上のノウハウを具体的な例を挙げて紹介する。

2. スターリングエンジン用熱交換器ケース

2.1. 構造の特徴

本スターリングエンジンは β 型と呼ばれ、出力を取り出すパワーピストン(PP, Fig. 1)と作動ガスを高温部と低温部に交互に移動させるディスプレイサピストン(DP, Fig. 2)が同軸上に配置され、位相差を持って往復運動をする。更にDPは中間に再生機を挟んだ構成で上側と下側にそれぞれピストンを持っている。PP, DPともにボア径が58mm, ストロークは23mmである。



Fig. 1 Power piston

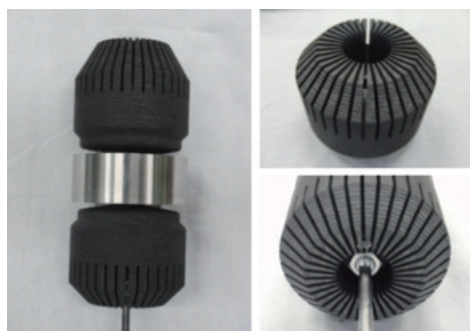


Fig. 2 Displacer piston

通常のスターリングエンジンでは外部との受熱、放熱を促進するためのフィンがシリンダ外側にのみ配置されているのに対し、壁面内側で作動ガスとの熱の授受を促進するためにシリンダ内側にも放射状のフィンが設けられていることを特徴とする。ケース内部に配置されるピストンはこのフィンを避けるために放射状の細い溝が切られており、フィンとの隙間は最小にしつつ運転中の接触を防ぐために高い形状精度が要求される。

ケース全体は外側に板金フィンをロウ付けした高温部のアップケース(Fig. 3)と低温部のロアケース(Fig. 4)の2部品で構成される。アップケースの内側には放射状フィンに加えて移動中の作動ガスを加熱するための熱交換器が周囲に配置され、ロアケースには同じく放射状フィンに加えて移動中の作動ガスを冷却するための熱交換器およびその外側には冷却水を流す水冷ジャケット(Fig. 5)が円周状に配置され、これらが全て一体化された多機能複合ケースで

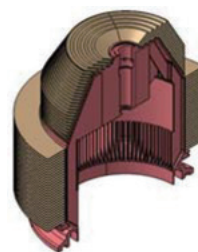


Fig. 3 Upper case

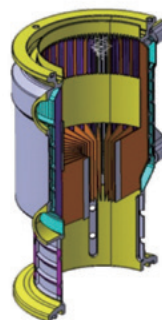


Fig. 4 Lower case

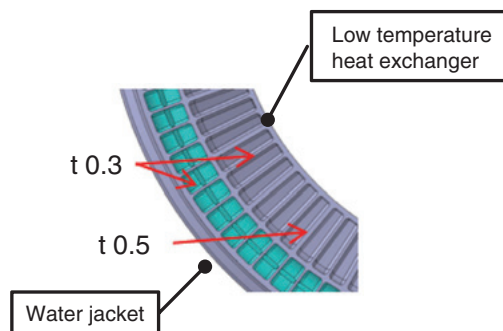


Fig. 5 Water jacket and heat exchanger of lower case

ある。また性能を維持しながら熱交換器を小型にするために、熱交換器はミリ単位の隙間が複雑に構成された微細形状を持つ。

これらを満たす製作手法は従来なく、金属材料のためのアディティブマニュファクチャリングいわゆる 3D プリンタを使って初めて実現できるものである。

2.2. 要求精度

軽量化のために高圧ガスに対する耐圧容器は厚さは 1 mm の薄肉であり、加工代 0.2 mm を仕上げ加工で除去する。また放射状フィンの厚みは 0.5 mm であり、ピストンに切られたフィンを避けるための放射状溝は幅 0.9 mm - 1.2 mm、溝の隙間は僅か 0.2 mm - 0.35 mm である。したがって円筒ケースの真円度やフィンの直線度および厚みに対しても厳しい精度が要求される。

3. AM 装置

3.1. AM 装置

成型には EOSINT M270 を使用した。装置の諸元を Table 1 に示す。素材は耐熱合金粉末を使用した。装置の外観および制御用のコントローラ画面の写真を Fig. 6 に示す。レーザを照射する装置内の小部屋には、酸化を防止するために不活性ガス（窒素）を流しながら造形する。



Fig. 6 Additive manufacturing device

Table 1 Molding conditions

Device name	EOSINT 270
Powder materials	Co-Cr-Mo
Powder grain size [μm]	30 - 40
Laser output [W]	200
Spot diameter [mm]	0.1 (minimum)
Scan speed [mm/s]	800 (maximum)
Laminating thickness [μm]	40
Blade	Carbon brush
Building size [mm]	250X250X215

3.2. 試作モデル

試作モデルはアップケースとロアケースをそれぞれ 2 セット、合計 4 セットを同時に製作した。また内部の確認のため材料検証用の切り出しテストピースも同時に造形した。あらかじめ準備された土台を除いて積層造形時間は 140 時間であった。Fig. 7 に造形モデルを示す。

製品はブレードと呼ばれる板により、粉末材料を一定の厚さに荷重をかけながら薄く引いた後に、レーザで造形部分を溶かし、40 μm ずつ下から積み上げていくことの繰り返しにより造形される。造形の様子を Fig. 8 に示す。

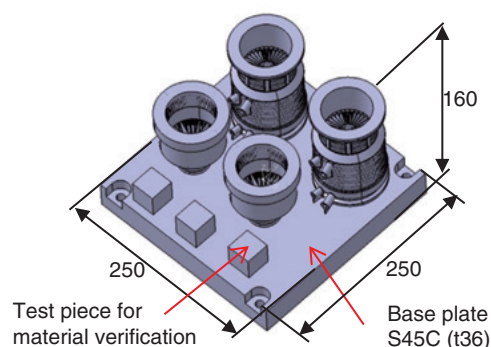


Fig. 7 Molding model

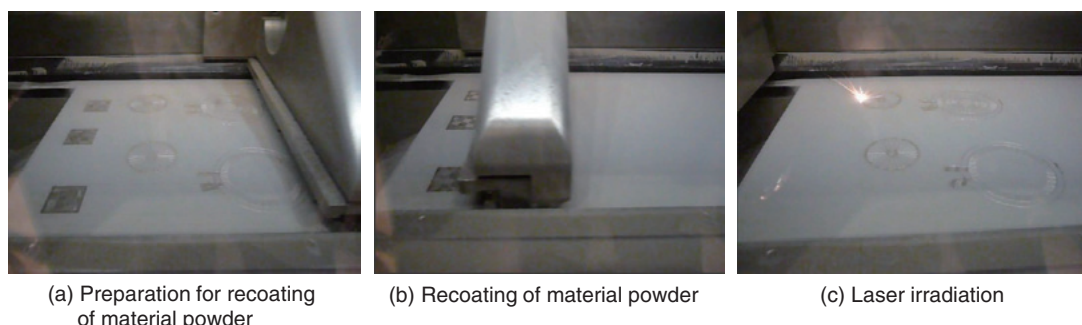


Fig. 8 Molding process

4. 試作

専門メーカを含め本試作品の製作に当たっては、前例がない形状であることから3回にわたり試作改良を行うことでようやく完成品を見ることができた。

4.1. 放射状フィン補強リングとカーボン製ブラシ

試作前の段階から薄肉板厚 0.5 mm の放射状フィンの造形精度が困難と予想された。そこで造形中の変形を防止するため強度アップを狙って後工程で除去する補強リングを設けた (Fig. 9)。

結果は放射状フィンは変形することなく十分な精度が確保できた一方で微細熱交換機部分の隔壁のブレードが直交する部分のフィンの形状が崩れてしまった (Fig. 10)。これは粉末の密度を少しでも高めるために金属性やセラミック製のブレードで粉末を強く押し付けながら敷いていくためと推定される。そこでいわゆるほうきのようなカーボン製ブラシを用いたところ解決した (Fig. 11)。

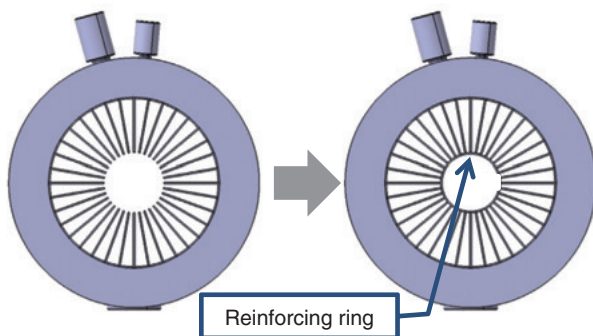


Fig. 9 Reinforcing ring

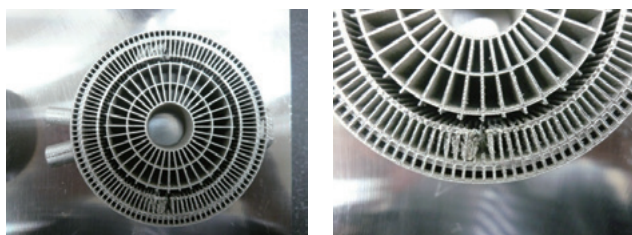


Fig. 10 Fin damage

厚肉部品ではカーボン製ブラシを使用すると粉末密度不均一等の問題が生じ、相対密度の低下が懸念される。しかしフィンのような薄肉形状に対しては、密度低下の問題がないことがわかった。これは後述する材質検査においても確認できた。

4.2. ロアケース縦長外周フィン補強リング

カーボン製ブラシの使用により放射状フィンは改良されたが、次にはロアケース外周の低温部フィン型熱交換器のうねりが発生した (Fig. 12)。

そこで対策としてアップケースの放射状フィンの場合と同様に、後で加工による除去を行うことを前提に薄肉の補強リングでフィンの露出部を覆うことで再度試作したところ、補強リングの除去後にうねりが無いことがわかった (Fig. 13)。

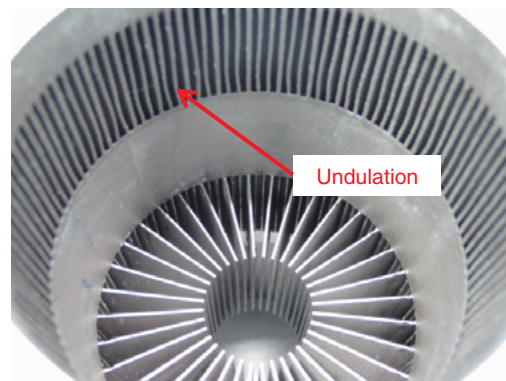


Fig. 12 Vertical fins (0.5 mm thickness) with undulation

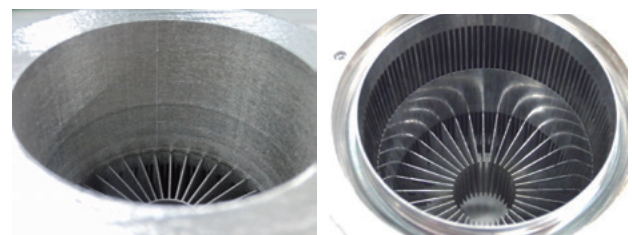


Fig. 13 Reinforcing ring before machining (left) and after machining (right)



Fig. 11 Conventional metal and ceramic blades and carbon blade

同じようなケース内側外周の縦方向フィンであっても、アッパケースや放射状フィンに隠れた部分のように距離がおおよそ 2 cm 以下の短い部分はどうなることがなかった (Fig. 14)。

4.3. 残材料除去孔

ロアケース外周の低温部フィン型熱交換器のうねり対策のため補強リングを付けた結果、内部に残った粉末が熱処理の段階で固まってしまい除去が不可能となった (Fig. 15)。これは成型後の熱処理で 1050℃ まで温度を上げた時に拡散接合を起こしたと考えられる。

このように補強リングを付けるなどして先が行き止まりになった深い形状で、隙間の小さい微細構造の場合には、成型後の熱処理時に拡散接合により材料粉末凝固が発生するため、粉末の除去を事前に考えておくことが重要であるとわかった (Fig. 16)。

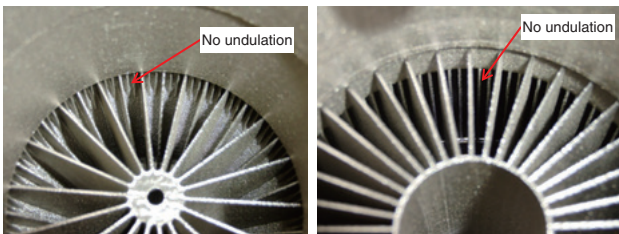


Fig. 14 Short vertical fins without undulation



Fig. 15 Congealed powder remaining after machining work to remove reinforcing ring

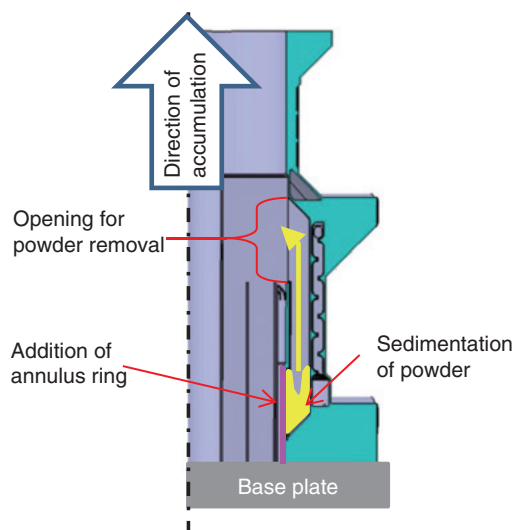


Fig. 16 Section of lower case

対策としては、補強リングに粉末除去のための小穴を開け、熱処理前に粉末を排除した。成型後に加工で取り除く 3 箇所のサポートに小穴を開ける対策をした (Fig. 17 - Fig. 19)。

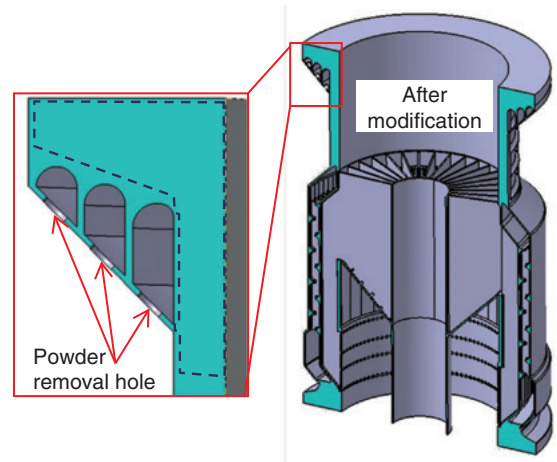


Fig. 17 Powder removal hole-1

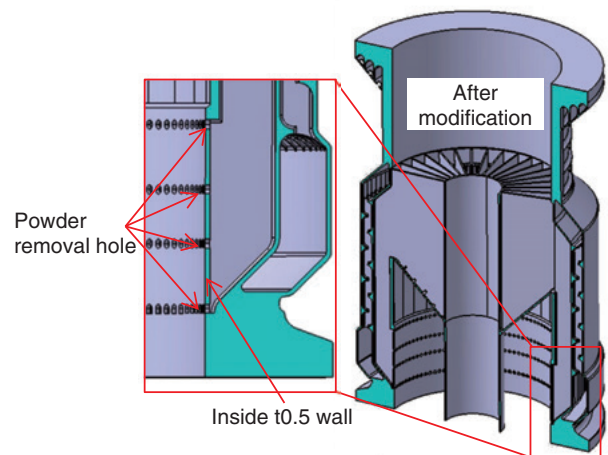


Fig. 18 Powder removal hole-2

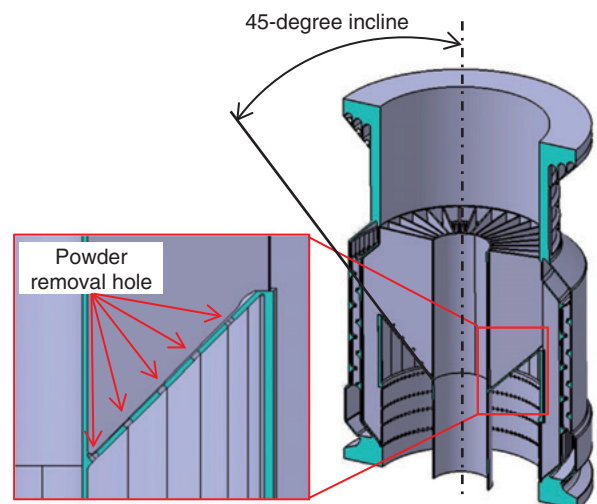


Fig. 19 Powder removal hole-3

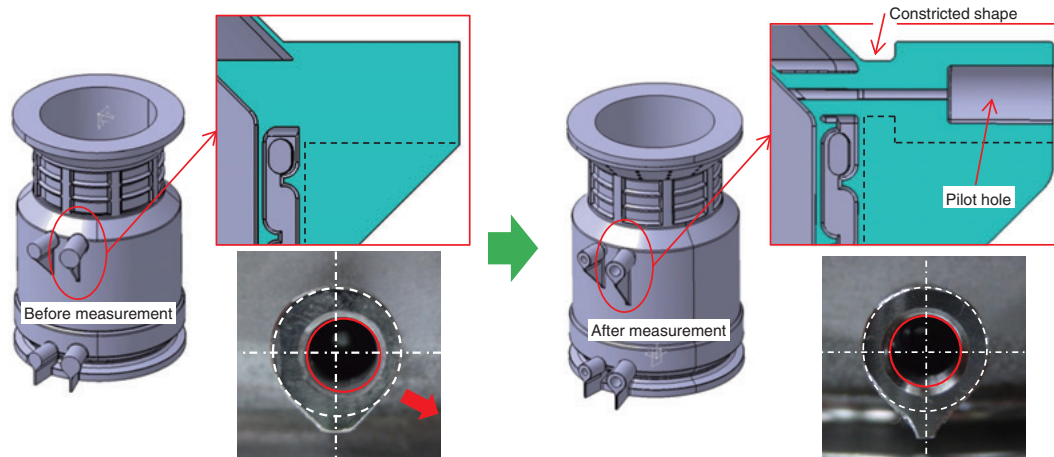


Fig. 20 Modification of boss shape

4.4. ボス等の厚みが異なる部品が隣接する場合

薄肉部と厚肉部が隣接するボス周辺でネジ穴の中心が 1 mm 以上ずれて成型された。これは熱収縮による変形が原因と考えられる。

ボスの付け根をくびらせたり下穴をあらかじめ開けて置くなど、設計上はなるべく全てを一定の厚さに近づけることが重要である (Fig. 20)。

4.5. ロウ付け部品と仕上げ加工

アップケース外側の熱交換フィンは板金プレス品をロウ付けした。これはどうしてもこの形状が必要であり、上方に向けて 45 度より小さい角度を持つ円錐形状や平行な円盤の積み重ね形状であるため、積層による成型が不可能と判断したためである。金属積層とロウ付け技術を併用することは可能である (Fig. 21)。

仕上げ加工での補強リングの除去 (スリーブ内径) は最初は放電でトライしたが、面粗度が確保できなかったため、砥石による研作加工に変更した。

ロアケースには、ピストン浮上のためのネオジム磁石取り付け溝などを加工した (Fig. 22)。



Fig. 21 Upper case

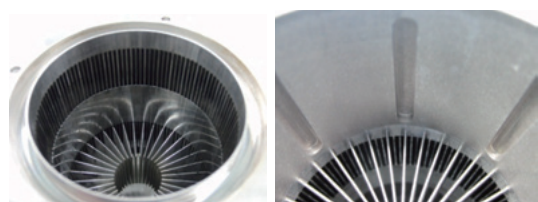


Fig. 22 Lower case

5. 検査

5.1. X線検査による粉末除去の確認

検査装置は管電圧 225 kV の株式会社島津製作所製マイクロフォーカス X 線 -CT SMX-225CT-SV3 を用いた。断面検査は粉末の残りやすい断面を複数計測した。検査装置と断面検査箇所を Fig. 23, Fig. 24 に示す。

補強リング部に小孔を空けることですべての箇所粉末が除去されていることが X 線撮影で確認できた (Fig. 25, Fig. 26)。



Fig. 23 Shimadzu Micro-focus X-ray CT System (SMX-225CT-SV3)

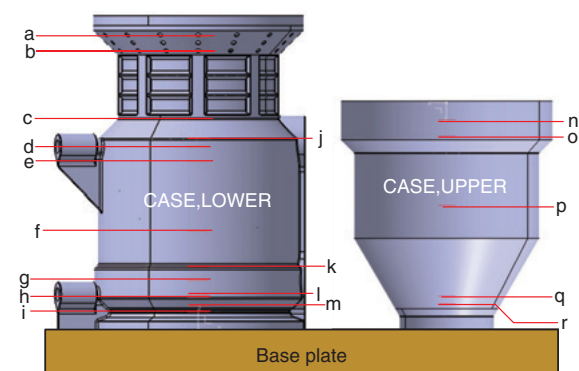


Fig. 24 X-ray measurement sections a - r

5.2. 寸法検査

ケースの内径はピストンとの微細なクリアランスを実現するために、高精度の直径および円筒度が要求される。造形後の機械加工が不可能なフィン付け根の円筒部 (Fig. 27) については、最初の造形時に 3 次元計測により、設計

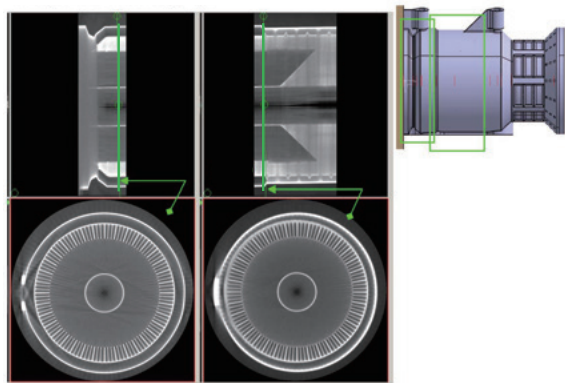


Fig. 25 Lower case sections (radial fins)

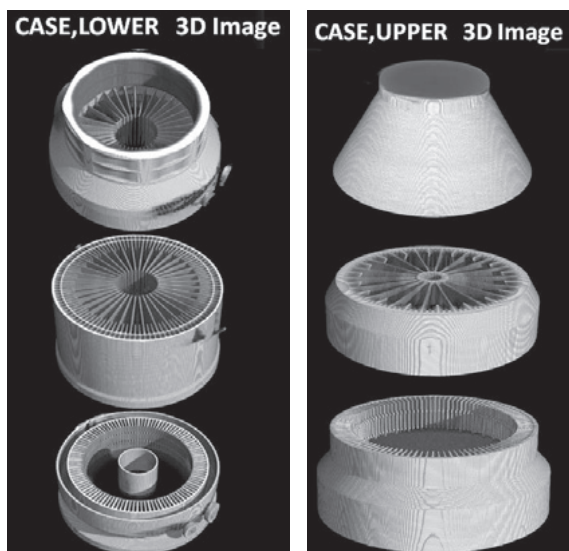


Fig. 26 Lower and upper case sections

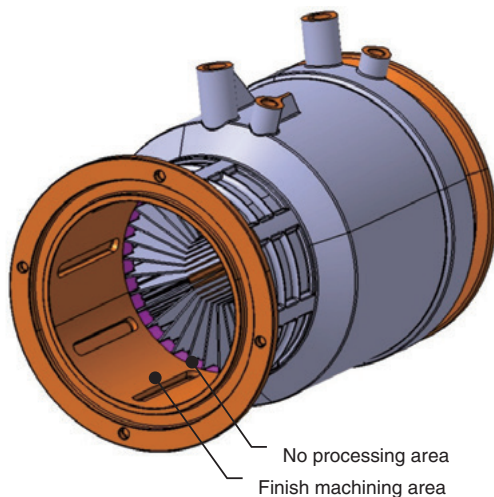


Fig. 27 Area where finish machining cannot be performed

Table 2 Density of test pieces

Test piece	Volume [cm ³]	Mass [g]	Density [g/cm ³]
1	8.10	67.75	8.36
2	8.25	69.00	8.36
3	8.37	69.70	8.33
Average	-	-	8.35

値とのずれを計りキャリブレーションを行った。Fig. 28 に示すように、熱収縮が原因で設定した値よりも半径でおよそ 0.2 mm 小さく造形される。また半径のばらつきが最大で 0.17 mm であることから、熱収縮を考慮することにより、必要な公差 0.2 mm に収めることが可能である見通しも得た。

最終的には設定値を直径 58.4 mm と収縮を見越した大きい値とすることにより、必要な公差内に収めることができた。

5.3. 素材特性検査

カーボン性ブラシをブレードに使用したこともあり、素材に問題が無いことを確認した。

5.3.1. 密度の検証

デジタル比重計を用いた水中懸架 (置換) 方法により材料データ (8.3 g/cm³) に対して同等レベルであることが確認できた (Table 2)。

5.3.2. 硬度の検証

ロックウェル硬度計を用いて硬度を測定した。硬度計は先端が半径 0.2 mm, 120° ダイヤモンド円錐のものを使用し、150 kgf を加重した。

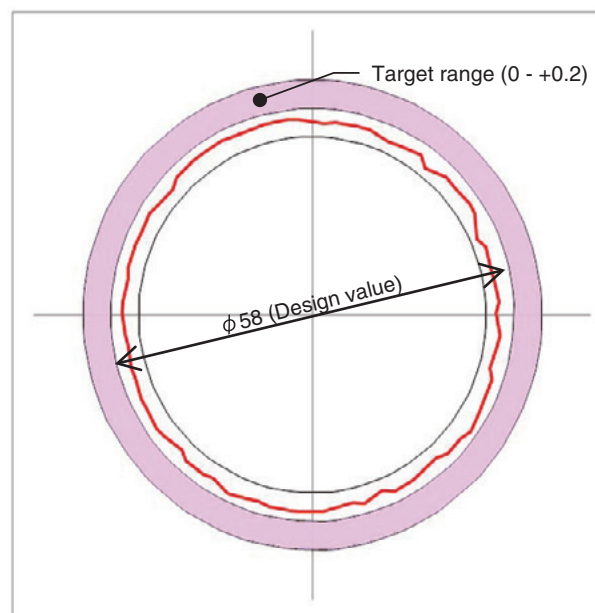


Fig. 28 Examination for dimension calibration

Fig. 29 に試験片の硬度計測結果を示す。平面方向を X/Y 軸、積層方向を Z 軸とする。材料データ (35-45HRC) に対して平面方向の硬度がやや低い傾向にあるが、実用には問題ないレベルと判断した。

5.3.3. 光学顕微鏡による内部品質

表層および内部 (10 mm - 20 mm) の組織検査で有害な箇所は見当たらなかった。

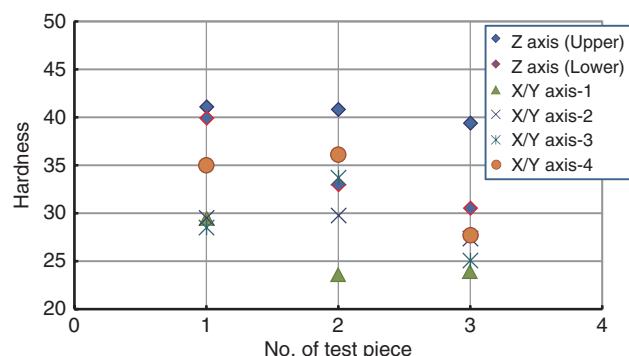


Fig. 29 Comparison of test piece hardness (HRC)

6. 設計手法まとめ

6.1. 制約条件

積層造形法である AM では粉末状の材料を下から 1 層ずつ積み上げていく。このため上からぶら下がる様な形状は、サポートと呼ばれる構造体で下方から支持し、成形後に除去する必要がある。また下からの積み上げであっても、45° より小さい傾きで積み上げることができないという制約がある。

さらに粉末粒径にもよるが、一般的な構造体に用いる場合には、1 mm 以下の薄板には歪が大きく向いていないと言われている。実際に本報のような微細構造を持つ構造体に何の対策もせず造形を行うと、薄肉部に歪を生じる場合がある。

6.2. 設計上のノウハウ

粉末を敷くブレードをカーボンブラシ製に変更することで、押し付け荷重が減少し薄板でも形状が崩れることを防止できる。

板厚が 0.5 mm と薄く、距離が長いフィン部においては、造形後に除去する補強リングを付けることによって歪を生じずに造形できる。板厚が 0.5 mm であっても、熱交換器フィン部のように距離がおおよそ 2 cm 以下と短ければ歪を生じない。同様に水冷ジャケット内フィンも板厚が 0.3 mm と微細な構造でありながら、距離が数ミリ程度と小さい場合には問題がなく造形できる。

補強部材の追加により袋小路に閉じた部分ができる場合

には、内部の粉末を熱処理前に除去するための小穴を設けておく必要がある。

薄板形状とボスやフランジのような肉厚部分が隣接する場合には、ボスのネジ下穴をあらかじめ抜いておくなど肉厚の変化を少なくすることが歪防止に有効である。

アップケース外側の円錐状フィンのようにどうしても積層造形が不可能な箇所は、別の整形手法による部品 (例えば板金プレス品) とのロウ付け等と併用することも可能である。

機械加工が不可能であり、積層後の素材寸法に高精度が要求される箇所については、あらかじめ熱収縮による寸法変化量を測定し、キャリブレーションを行うことが必要である。

7. 結論

最新の AM 技術を用いて、高い造形精度と緻密で複雑な形状を持つスターリングエンジン用の熱交換器内蔵ケースを試作するに当たり、従来のノウハウに加えて様々な工夫が必要であることがわかった。

製造装置としてはブレードの押し付け力を減らすためのカーボンブラシの使用が有効であり、成型後に加工で除去するサポート形状に工夫を凝らすことで積層造形中の歪を生じさせないことや、熱処理前に残留粉末を完全に取り除くための穴の必要性が挙げられる。

これらの新しいノウハウを設計段階から投入することで、他の製法では容易に真似をすることができない金属積層ならではの緻密で複雑な形状の製品の製作が可能であることを実証できた。

参考文献

- (1) 新野俊樹, 安齋正博: 積層造形技術の動向, 素形材, Vol.48, No.7, p.1-5, (2007)
- (2) 酒井仁史: 新たな製造法”アディティブマニュファクチャリング (AM)”その使い方と勘所, 素形材, Vol.54, No.2, p.47-53, (2013)
- (3) 木皮和男: 自動車産業における金属積層造形技術の活用, 日本機械学会 2015 年度年次大会, No.15-1, (2015)

著者



浅沼雅彦



遠藤恒雄



酒井仁史