

バインダーージェットング技術による高性能アルミニウム製 熱交換器の設計と製造

Design and Manufacture of High-Performance Aluminum Heat Exchangers with Binder Jetting Technology

辻 真人*
Masato TSUJI

伊東 陽一*
Yoichi ITO

早川 翔太*
Shota HAYAKAWA

磯 孝斉*
Kosei ISO

佐藤 智子**
Tomoko SATO

稲葉 賢一***
Kenichi INABA

要 旨

製造業のデジタル製造化が進む中、付加製造（Additive Manufacturing, 以下AM）技術はデジタル化をさらに加速可能な技術として活用が広がっている。我々リコーも、これまでの様々な製品・研究開発で培ってきた技術を活用し、金属バインダーージェットング技術の開発に取り組んでいるが、さらなる価値を高めるためには、AMに合わせた設計の考え方が必要である。本論文では、アルミニウム製の熱交換器を対象として、バインダーージェットング技術での製造性および、熱交換器の性能向上の両立を目的とした事例を示す。具体的成果として、水冷ヒートシンクの内部フィン領域に、従来の製造方法では製造が困難なGyroid構造を適用し、従来工法品と比較して約30%の熱抵抗低減を達成した。

ABSTRACT

In the digitalization of manufacturing, the use of additive manufacturing (AM) is expanding as a technology that can further accelerate digitalization. Ricoh has been working on developing metal binder jetting using the technologies we have previously developed in our various products and R&D activities. However, to increase the value of metal binder jetting as a manufacturing process, its design concept needs to be tailored to AM. In this paper, we present a design case study for a heat exchanger made of aluminum that can improve both the manufacturability and heat exchange performance with metal binder jetting. Specifically, a gyroid structure, which is difficult to manufacture using conventional manufacturing methods, was applied to the internal fin area of the water-cooled heat sink. The resulting thermal resistance was reduced by approximately 30% compared to the product fabricated by the conventional method.

* リコーフューチャーズビジネスユニット AM事業センター
AM Business Center, RICOH Futures BU

** リコーフューチャーズビジネスユニット インキュベーションセンター
Incubation Center, RICOH Futures BU

*** 先端技術研究所 共通基盤センター
Fundamental Technology Institute, Advanced Technology R&D Division

1. 背景と目的

製造プロセスのデジタル化により、製造現場のあらゆる情報がデジタル化され、利活用されている。付加製造（Additive Manufacturing, 以下AM）技術は、製造業のデジタル化をさらに加速可能な技術であり¹⁾、試作から量産、樹脂から金属材料へと、活用の幅が広がっている²⁾。

我々リコーも、高生産性・アルミニウム部品の製造を可能とするバインダージェットイング（Binder Jetting, 以下BJT）技術の開発に取り組んでいるが、さらなる価値を高めるためには、AMに合わせた設計の考え方（Design for AM, 以下DfAM）が必要である。

本論文では、DfAMによるBJT技術の使いこなし・価値の向上事例として、BJT技術を用いたアルミニウム製熱交換器の設計・製造事例を示す。

2. 技術背景

2-1 BJT技術の概要

金属材料を用いるAM技術では、粉末床溶融結合（Powder Bed Fusion, 以下PBF）技術が主流である。この技術では、積層した金属粉末材料にレーザーや電子ビームを照射し、直接溶融させることで造形物を得る。しかしながら、所望の形状に対してレーザー又は電子ビームを層ごとに選択的に照射する必要があり、伝熱に配慮したサポート構造も必要となる。また、サポート構造は造形後に除去する必要があり、これらは生産性に大きく影響する³⁾。

我々が開発しているBJT技術も金属材料に適用可能なAM技術の一種であり、積層された粉末に結合剤（以下、バインダー）を塗布し、粉末をバインダーで固めることで積層造形を行う技術である。金属粉末をバインダーで固めた焼結前駆体（以下、グリーン体）を造形後に乾燥・脱脂・焼結することで、目的の造形物を得ることができる。この技術では、

バインダーの塗布にインクジェットヘッドを用いており、一度にインクジェットヘッドの吐出幅でバインダーを塗布できる。また乾燥・脱脂・焼結などの造形後の工程はバッチ単位での処理が可能であり、PBF技術で必要となるサポート構造の除去工程も不要であることから、PBF技術における生産性の課題を解消できる可能性がある。

Fig. 1に、本検討で使用したBJT装置の動作の概略を示す。典型的なBJT装置と同様、供給槽と造形槽、各槽の上を往復するリコーター、バインダーを塗布するインクジェットヘッドを有する。供給槽と造形槽の底面にはそれぞれ昇降可能なステージを備え、昇降量を制御することで供給量および積層ピッチを決定した。リコーターは金属製の丸棒であり、移動方向に円筒が転がる方向と逆の方向に円筒を回転させながら移動する。

インクジェットヘッドは、リコーターが初期位置へと戻った後、造形槽上に移動させた。インク吐出領域は、3Dデータから積層ピッチ間隔に分割したスライスデータを基に決定された。これらの一連の動作を複数回繰り返すことで、目的のグリーン体を造形した。得られた造形物を造形槽から取り出し、非造形部の粉末を除去した後、乾燥・脱脂工程によ

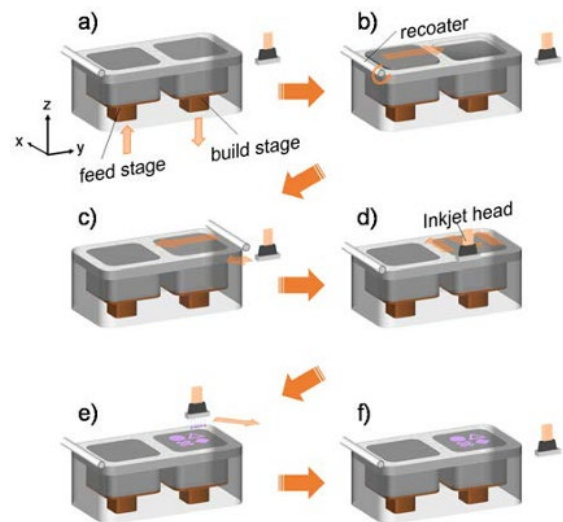


Fig. 1 Schematic illustrations of binder jetting process; a) moving feed and build stages, b)–c) transporting the coating powder from the feed area to the build area, and d)–f) depositing ink to form a cross-section of the object.

りバインダーを揮発させ、焼結することで焼結体を得た⁴⁾。

2-2 BJT技術とアルミニウム

アルミニウムは軽量かつ電気・熱伝導性に優れた材料であり、構造部品・熱交換部品など幅広い工業製品に利用されている。一方で焼結時、アルミニウムの表面に存在する酸化被膜が焼結収縮による緻密化を阻害するため、アルミニウムは難焼結材として知られており⁵⁾、焼結工程を含むBJT技術において実用化された例はない。

PBF方式においては、アルミニウムの持つ高い熱伝導率からレーザーを吸収しにくく、アルミニウム粉末を熔融させることが難しい課題があったが、波長が短く反射率の低いファイバーレーザーなどを用いることにより、現在ではアルミニウムの造形が一般的となっている⁶⁾。一方で、生産性は材料種によらずPBF方式の課題であり、極力サポート構造が不要となる設計とすることや、複数のレーザーヘッドを搭載するなどして生産性の課題に取り組んでいる。

我々は、インクジェット技術に関して継続的な研究および製品開発を行っており、また電子写真分野で培った粉体技術などを活用し、難焼結材であるアルミニウムを高い生産性で製造可能とするBJT技術の開発に取り組んでいる。

2-3 DfAMの持つ2つの側面

DfAMには製造のためと、性能向上のための2つの側面が存在する。以下に、これら2つの側面について説明する。

2-3-1 製造のためのDfAM

1つ目は製造性に関する側面であり、従来のあらゆる加工方法にも共通した考え方である。例えば、樹脂成型品における抜き勾配を考慮した設計や、板金・プレス部品における無理な曲げを避ける形状付与（曲げ逃げなど）が該当し、従来工法ではDFM (Design for Manufacturability) などとも言われている。

AMにおいても、造形方向による異方性など、ほぼ全てのAM技術に適用すべき原則のほか、サポート構造などAM技術ごとに考慮すべき原則が存在する。ここでは次に述べる2つ目の側面と区別するため、製造のためのDfAMと定義する。

2-3-2 性能向上のためのDfAM

2つ目はAMの価値を最大化するための側面である。AMでは従来の製造方法では製造できなかったような複雑な形状を製造することができ、部品の性能を大きく向上させることが期待できる。具体的な形状例として、位相最適化により得られるような有機的な形状や、Lattice構造などが挙げられる。ここでは1つ目の造形品質のためのDfAMと区別して、性能向上のためのDfAMと定義する。

位相最適化は、1980年代後半に初めて導入されたが⁷⁾、位相最適化により生成される形状が非常に複雑であることと、一般的な順解析と比較して計算コストが高くなるため、学術的な用途に限られていた。近年、AMの発展により形状の製造に関する課題が解決されつつあり、コンピュータ性能の向上によって位相最適化のための専用のソフトウェアが登場するなど、急速に適用が広がっている⁸⁾。Lattice構造 (Fig. 2) は、ある単位セルが周期的に三次元に続いていく構造のことを言い、必要な用途によって適切な単位セルを選択することが可能である。従来工法でも製造可能なハニカム構造もこれらLattice構造の一種であり、特定の方向への強度・剛性確保と、軽量化を実現可能な構造である。Gyroid構造は3方向に無限に自己交差しない周期的な構造であり、単位体積あたりの表面積が非常に大きいため熱伝達性

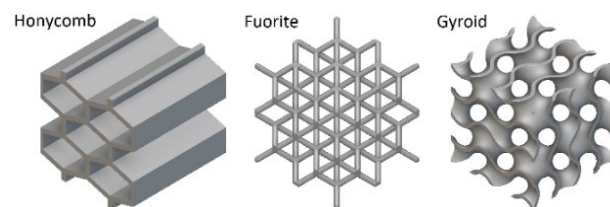


Fig. 2 Examples of Lattice structure.

に優れ、また構造が曲面で構成されているため応力集中が発生しにくいことが特徴となっている。この入り組んだ構造を従来工法で製造することは困難であり、AM技術を活用して、熱交換部品などのアプリケーションに広く適用され始めている⁹⁾。

3. DfAM事例

本章では、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) の冷却などに用いられる熱交換部品の一つである水冷ヒートシンクのDfAM事例を示す。

IGBTは電気自動車用モータ制御などに用いられるパワー半導体の一種である。電気自動車の高性能化に伴い、IGBTの発熱量も大幅に増加しており、これらに対応した水冷ヒートシンクの冷却効率向上が求められている。

一般的な水冷ヒートシンクは、目標とする冷却性能、発熱体の温度分布や圧力損失の値を基に、内部に、冷却水入口から出口に至る流路を構成する。あるいは、冷間鍛造などでピンフィンなどのフィン構造を製造し、別途製造したカバーと組み合わせて内部の流路を構成する方式が知られている (Fig. 3)。

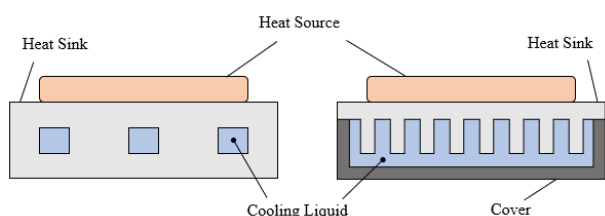


Fig. 3 Integrated and assembled water-cooled heat sinks.

今回は、水冷ヒートシンク単体の性能をより正確に評価するため、単一材料・部品で構成可能な前者のタイプの水冷ヒートシンクを対象とし、内部の流路領域にGyroid構造を適用した。また、製造性・性能性の両方を考慮して、Gyroid構造のパラメータ設計を行った。Gyroid構造のパラメータは、Fig. 4に示したセルサイズおよび肉厚とした。

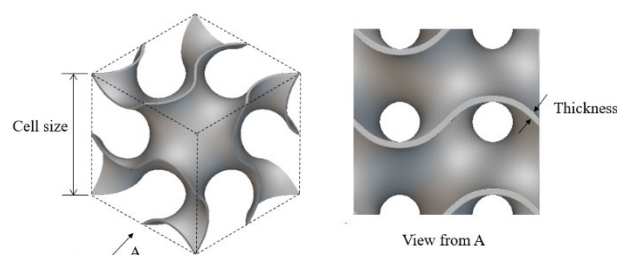


Fig. 4 Parameters of Gyroid structure.

3-1 製造性のためのDfAM

BJT技術においては、内部の余剰粉の除去性を考慮した設計や、バインダーの有無や含有量によって部品が完成するまでの各工程で必要な強度が変化することによる、各工程での必要な強度に対応した構造設計が必要となる。

余剰粉除去性は、セルサイズおよび肉厚に対応した空隙率に依存する。セルサイズが大きく、肉厚が薄いほど空隙率は大きくなる。また空隙率が大きいほど、内部の余剰粉の通り道が大きくなり、除去が容易となる。除去用に追加の穴を設け、最終的にスクリーンプラグなどで封止する手段も一般的ではあるが、本検討では、余剰粉除去後のグリーン体についてX線観察、焼結後の焼結体について断面観察などを行い、既存の冷却水の入口・出口穴から無理なく除去可能なセルサイズ・肉厚の範囲を決定した。

構造設計に関して、一般的な構造体と同様に、Gyroid構造の肉厚が大きいほど様々な負荷に対する応力は小さくなり、形状を維持しやすくなる。また、ある肉厚に対してセルサイズが小さくなると、構造体の占める割合が相対的に大きくなるため、セルサイズは小さい方が構造的には有利である。加えて、応力は部品の接地条件に依存するため、適切な接地条件を設定することが重要である。Fig. 5に、脱脂工程で形状が維持できなかった例と、Gyroidのパラメータや設置条件の調整などにより改善した例を示す。条件調整には構造解析を活用し、形状が維持できなかった事例を参考に満足すべき応力の閾値を設定し、効率的に成立範囲の検討を行った。

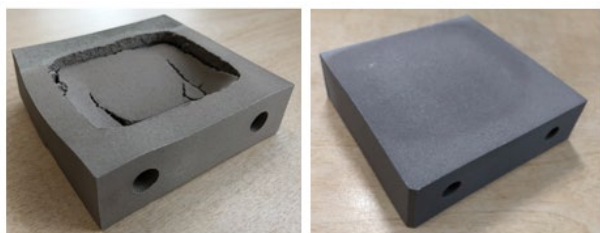


Fig. 5 Example of collapse after debinding.

余剰粉除去性と構造的な余裕度はトレードオフとなっているため、余剰粉除去性と構造面の両方を満たすセルサイズ・肉厚の範囲内で、次項の性能向上のためのDfAM検討を行った。

3-2 性能向上のためのDfAM

3-2-1 設計, シミュレーション条件

製造性を満たすセルサイズ・肉厚の範囲内で、熱流体解析を用いて水冷ヒートシンクの流路構造の検討を行った。

設計条件として、水冷ヒートシンクの外形形状、冷却水の入口・出口位置および熱源の形状はFig. 6とした。また冷却水の材質は水として、流入温度、流量、熱源の発熱量、雰囲気温度をTable 1とした。前記条件を基に、検討した内部流路の構造ごとに、冷却性能および圧力損失を評価した。

冷却性能に関しては、式(1)で表される熱抵抗 R_h [K/W]で評価した。ここで、 T_h [K]は熱源のヒートシンクとの接触面の平均温度、 T_i [K]は冷却水の流入温度、 Q [W]は熱源の発熱量を表す。

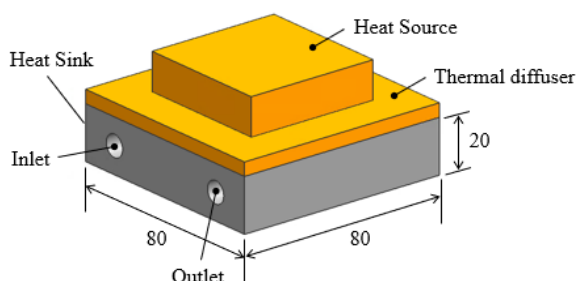


Fig. 6 Dimensional conditions for water-cooled heat sinks.

Table 1 Simulation conditions for water-cooled heat sinks.

Items	Value
Inlet temperature	20 [°C]
Flow rate	2,4,6,8 [l/min]
Heat Value	300 [W]
Ambient temperature	20 [°C]

$$R_h = (T_h - T_i)/Q \quad [\text{K/W}] \quad (1)$$

ヒートシンクの選定においては、取り付けられた熱源の温度をある目標値以下まで冷却することが重要である。目標温度は、熱源の発熱量および冷却水の流入温度にも依存するため、この熱抵抗の指標がよく用いられる。熱抵抗の値に熱源の発熱量を乗じて、冷却源の流入温度を加えることで、冷却された熱源の温度を見積もることができる。

圧力損失に関しては、出口圧力を一定として境界条件を設定し、入口圧力から出口圧力の値を引いた値とし評価した。

熱抵抗と圧力損失はいずれも小さいほど望ましい。熱抵抗に関して、水冷ヒートシンクの流路壁面と冷却水との間の熱交換に着目すると、流路壁面の表面積と冷却水の流速を大きくすることが効果的であるが、圧力損失が大きくなる方向でもある。熱源の目標温度や使用できるポンプの性能によって熱抵抗と圧力損失の目標値を設定することが一般的であり、今回は同一のポンプを使用することを想定して、圧力損失を同等に抑えた上で熱抵抗の低減を目指した。具体的には、今回の評価流量範囲の中心である5[l/min]において、圧力損失の増加に関して500[Pa]までを制約とし、銅製の水冷ヒートシンクからの置き換えも想定可能となってくる20%以上の熱抵抗低減を目標値とした。

比較対象として従来工法でも製造可能な一般的なM字の流路を持つモデルを作成し、Gyroid構造を適用したモデルと比較した。Fig. 7に、M字流路およびパラメータ検討の上決定したGyroid流路の3Dモデルを示す。

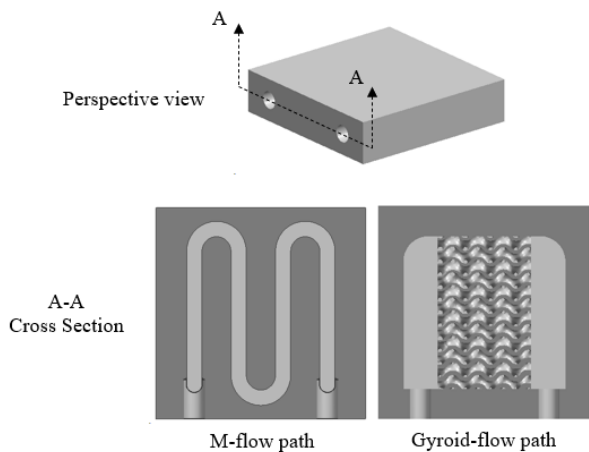


Fig. 7 Designed model.

3-2-2 シミュレーション結果

Fig. 8に、熱抵抗および圧力損失のシミュレーション結果を示す。今回評価した流量範囲（2～8[l/min]）では、M字流路モデルに対してGyroid流路モデルは熱抵抗が36.0～37.8%改善し、圧力損失は同等以下に抑えられる見込みが得られた。

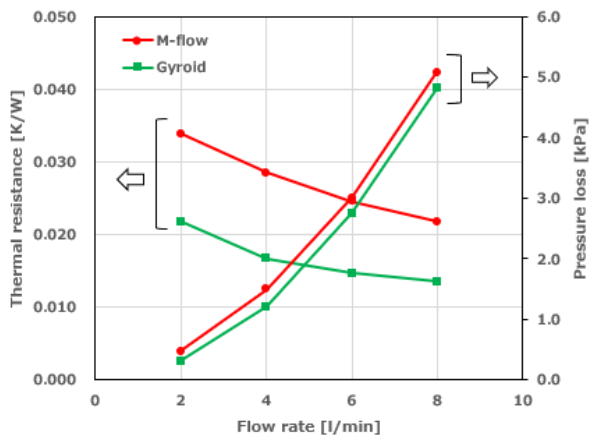


Fig. 8 Simulation results of thermal resistance and pressure loss.

熱抵抗が大きく改善した要因として、Gyroid流路モデルはGyroid構造の持つ大きな表面積により、熱源の接触面からより均一に熱を奪えているためと考えられる。Fig. 9に流路に垂直な断面での各モデルの温度分布を示す。M字流路モデルと比較して、

Gyroid流路モデルは、全体的に熱源の温度上昇が抑えられており、かつ紙面の左右方向で熱源接触面付近での温度勾配が小さいことが読み取れる。

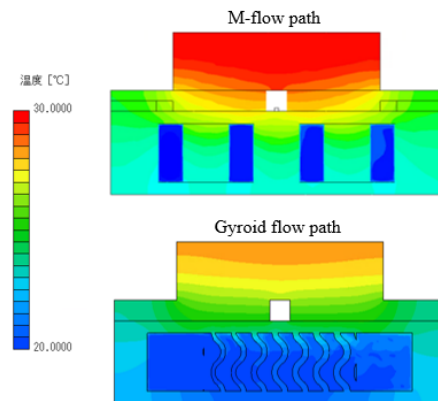


Fig. 9 Temperature distribution in the cross-section perpendicular to the flow path.

4. 実測結果

前記のシミュレーション結果により熱抵抗の改善見込みが得られたため、Gyroid流路モデルについてはBJT装置でサンプルを製作し、熱源や配管部品の取り付け部などを機械加工した上で、配管部品を取り付け、実測評価を行った。Fig. 10に作成したGyroid流路モデルの外観および、Fig. 11に同条件で製造したカットモデルを示す。M字流路についても切削加工で流路部を作成し、別途作成した天面部をロウ付けで接合した後、配管部品を取り付け、同様に実測評価を行った。



Fig. 10 Appearance of the Gyroid model.

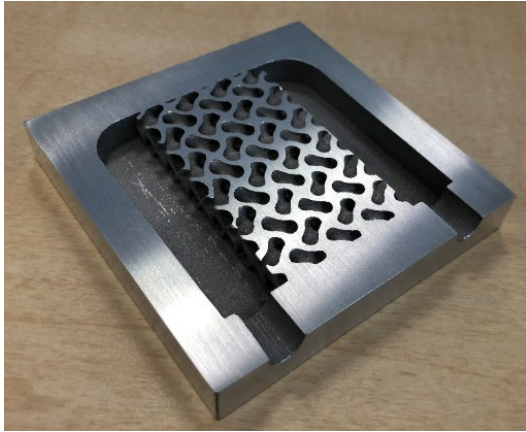


Fig. 11 Cutway model of the Gyroid model.

Fig. 12, 13に、それぞれのモデルの熱抵抗および圧力損失の実測結果を示す。実測においても、熱抵抗は各流量において約30%改善し、圧力損失についても全流量領域で500[Pa]以内の上昇に抑えられることがわかった。以上の結果により、シミュレーション結果の妥当性およびGyroid構造を適用した水冷ヒートシンクの有効性を確認することができた。

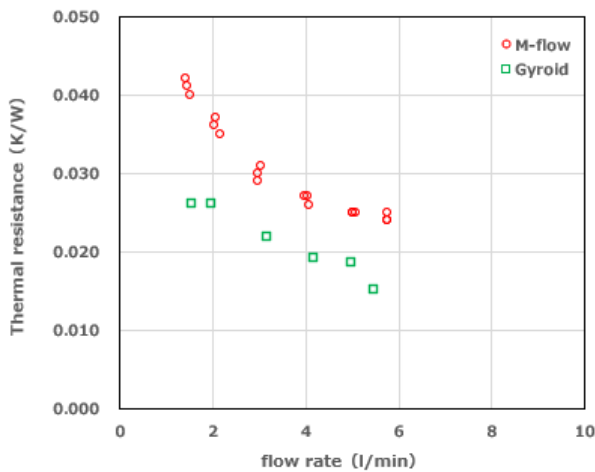


Fig. 12 Measured results of thermal resistance.

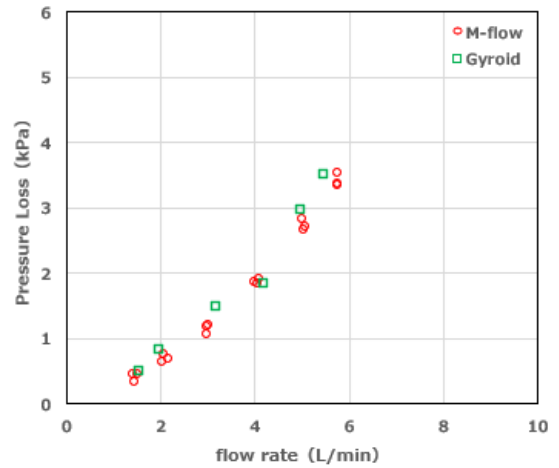


Fig. 13 Measured results of pressure loss.

5. 結論、今後の展開

DfAMによるBJT技術の使いこなし・価値の向上事例として、製造性と性能向上の2つの視点に着目し、難焼結材であるアルミニウム製熱交換器の製造に成功し、かつ従来工法品に対して圧力損失が同等で、約30%の熱抵抗低減した事例を示した。

熱抵抗の改善は先に述べた銅製の熱交換器からの置き換えのほか、EVにおけるモータのトルク性能向上などに転化できる可能性があり、車体の価値向上に繋がる可能性がある。また、モータのサイズダウンも可能となるため、車体重量の低減から電費の向上、CO₂排出量の削減など、様々な価値を実現できる可能性がある。今後、金属BJTプロセスの改善により製造可能な範囲を拡大し、拡大した範囲で流路形状を最適化する手法を併せて検討することで、より高機能な部品の提供を目指す。

またこれらDfAM技術と、高生産性・アルミニウム部品の製造を可能とするBJT技術を、その他システムと合わせて製造システム全体として提供することで、お客様の製造プロセス革新に貢献する。

参考文献

- 1) 経済産業省: 「新ものづくり研究会」報告書,
https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seisan/new_mono/report01.html (参照2014-02-21).
- 2) Wohlers Associates, Inc.: Wohlers Report 2022.
- 3) Olaf Diegel, Axel Nordin, Damien Motte: *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, Springer (2019).
- 4) 佐藤慎一郎, 佐々木隆文, 山口大地, 岩附仁, 山口剛男: 樹脂薄膜コーティング粉末を用いたインクジェット積層造形技術, *Ricoh Technical Report*, No. 42 (2017).
- 5) G. B. Schaffer, T. B. Sercombe, R. N. Lumley: Liquid phase sintering of aluminium alloys, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 67 (2001).
- 6) K. Kempen, L. Thijs, J. Van Humbeeck, J.-P. Kruth: Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, Vol. 39 (2012).
- 7) MP Bendsoe, O Sigmund: *Topology optimization: theory, methods, and applications*, Springer (2003).
- 8) Liu, J., Gaynor, A.T., Chen, S. et al.: Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing, *Struct Multidisc Optim* 5 (2018).
- 9) Tisha Dixit, Ebrahim Al-Hajri, Manosh C Paul, Perumal Nithiarasu, S. Kumar: High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 210 (2022).