

# 最適設計と金属積層造形による 伝熱プレートの均熱化の検討\*

佐藤 真\*<sup>1</sup> 鈴木崇司\*<sup>2</sup>

## Temperature Equalization of a Heat Transfer Plate by Structural Optimization and Metal Additive Manufacturing

Makoto SATO and Takashi SUZUKI

面内において均熱化が求められる伝熱プレートに対し内部構造のトポロジー最適化を行い、得られた要素密度から熱伝導率を算出し、これをラティス構造に置き換えることで、均熱化の向上が図れるかを検討した。ラティス構造の条件による金属積層造形の造形性の確認や有効熱伝導率の測定を行い、トポロジー最適化の解析条件に反映させた。要素密度範囲で領域分割し、それぞれに熱伝導率を割り当てて伝熱解析を行ったところ、均熱化への有効性を確認することができなかった。

キーワード：均熱化，トポロジー最適化，熱伝導率，ラティス構造，金属積層造形

### 1 はじめに

半導体や液晶の製造プロセスなどにおいて、面内の温度の均一性(以下、均熱性)は、製造プロセスの安定化や製品の品質向上を図る上で重要な要素である。均熱化の方法として、板厚やヒータの配置、発熱量、冷却配管の配置などの設計パラメータを適正化することが一般的に行われている。

既報では<sup>1)</sup>、3層のプレートとヒータで構成される伝熱プレートのトポロジー最適化を行い、内部構造を最適な形状にすることで表面温度の均熱化を図った。この結果から熱伝導率を連続的に変化させることで、さらなる均熱化が図れる可能性が示唆されたが、一方で、ヒータ直上の内部構造において大きな空洞が生じるため、強度低下が懸念された。

そこで、このような空洞が生じないように、任意の熱伝導率を持つラティス構造に置き換えることで、さらなる均熱化の向上と強度の解消が図れるか検討した。

本研究の作業フローを図1に示す。前半の実験では、ラティス構造の造形を行った。造形性の確認や有効熱伝導率の測定などを行い、造形により得られる熱伝導率の範囲を把握した。後半の解析では、前半の実験結果を解析条件に反映させたトポロジー最適化を行い、要素密度分布を求めた。これを任意の要素密度範囲で領域分割し、算出した熱伝導率を割り当てて伝熱解析を行い、均熱化

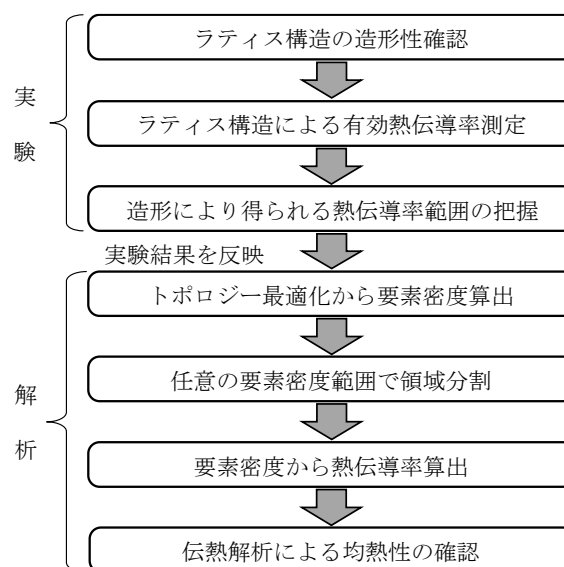


図1 作業フロー

の効果を確認した。

### 2 トポロジー最適化と伝熱問題への適用

密度法に基づくトポロジー最適化(以下、最適化)を実行すると図2(a)に示すような要素密度分布が得られる。要素密度は部材として必要な部分を表しており、0は部材なし、1は部材ありを表す。要素密度は0~1の連続的な値を持ち、計算過程においてなるべく0か1の分布に近づけるため、次式のようなべき乗法則のペナルティを課している。

\* 特別研究

\*<sup>1</sup> 設計支援部

\*<sup>2</sup> 金属材料部

$$E = E_0 \rho^p \quad (1)$$

ここに、

$E$  : ペナルティ後のヤング率  $E_0$  : 元のヤング率

$\rho$  : 要素密度  $p$  : ペナルティ係数

最終的に、図2 (b)に示すように任意の閾値(図でいうと0.6)で部材のありなしを決定する。(1)式は構造解析の例であるが、伝熱解析も同様と考えられる。

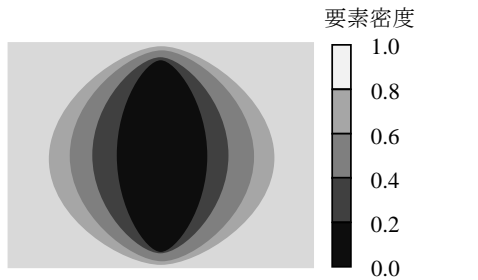
この場合、閾値が適切でないと所望の特性が得られないことがある。また、伝熱問題においては、部材ありなしで急激な熱伝導率変化が伴うため、均熱性の低下や、空洞ができることによる強度低下も懸念される。

そこで、空洞ができないよう図3のように熱伝導率を段階的に変化させたラティス構造で置き換えることで、これらの問題を解決できないか検討した。

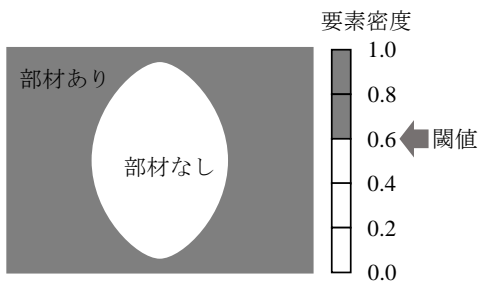
### 3 方法

#### 3.1 ラティス構造の造形性の確認

ラティス構造とは、図4のような枝状の単位格子が周



(a) 要素密度分布



(b) 閾値による部材有無の決定

図2 トポロジー最適化

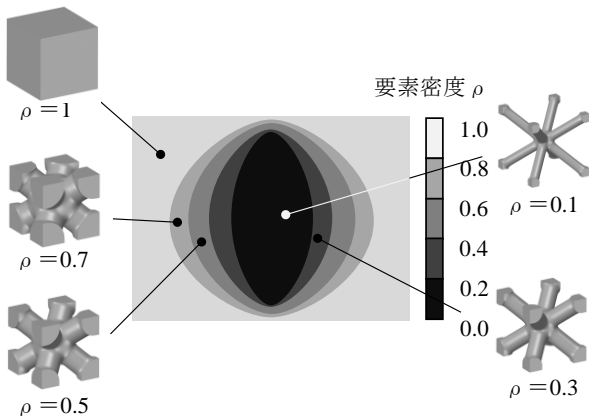


図3 ラティス構造による置き換え

期的に複数配置された構造をいい、ラティス条件によって軽量化や冷却効果、生体適合性などの特性を持たせることができることから、あらゆる分野で活用が広がっている。

はじめにラティス構造の条件(形状, ユニットセル長 $l$ , ビーム径 $r$ ) (以下, ラティス条件)による造形性(造形不良や造形後の粉抜き性など)を把握するための造形実験を行った。造形にはパウダーベッドフュージョン方式の金属積層造形装置(TRUMPF製, TruPrint 1000)を用い、金属粉末はAlSi10Mg0.4(Kymera International製)を使用した。また、造形条件はレーザー出力175W, 走査速度1400mm/s, 積層厚さ0.02mm, ハッチングピッチ0.08mmとした。

積層造形においては、オーバハング角が一般に45°を超えると造形不良が生じるため、その支えとなるサポートを生成する必要があるが、ラティス構造の場合、構造内のサポート除去は困難であるため、サポートレスで造形する必要がある。また、造形装置における造形可能最

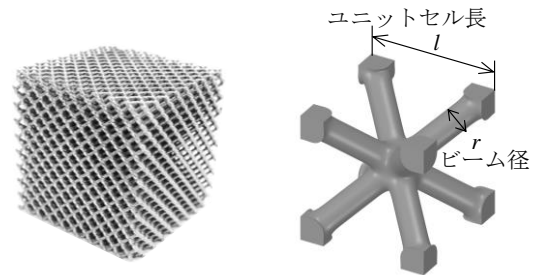


図4 ラティス構造

表1 ラティス条件

形状	BCC	SC	DC
	Body Centered Cubic	Simple Cubic	Diamond Cubic
ユニットセル長 $l$	2mm, 3mm, 4mm		
比率 $r/l$	0.10, 0.17, 0.23		
セル個数	5×5×5		

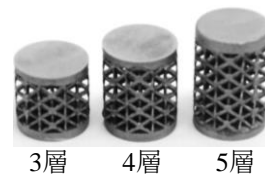


図5 熱伝導率測定用試験片

表2 熱伝導率試験片のラティス条件

形状	BCC	SC	DC
ユニットセル長 $l$	1.5mm, 2.0mm, 2.5mm	2.0mm	2.0mm
比率 $r/l$	0.10, 0.17, 0.23	0.17	0.17
セル層数	3層, 4層, 5層		

小寸法を考慮する必要があることから、実際に表1に示すようなラティス条件にて27種類の試験片を造形し、形状を確認することとした。ビーム径 $r$ についてはユニットセル長 $l$ に比率 $r/l$ を乗じた条件とした。また、オーバハンク角が $45^\circ$ を超える面における造形性を確認するため、上下に面を設けた。

### 3.2 ラティス条件による有効熱伝導率測定

ラティス構造では、ラティス条件を変化させることで任意の気孔率(かさ体積に対する空隙体積の割合)を持った構造を作り出せる。また、それにより任意の熱伝導率を作り出すことも可能である。ここで、ラティス構造のようなポーラスな構造における見かけ上の熱伝導率を有効熱伝導率といい<sup>2),3)</sup>、有効熱伝導率と気孔率に次式の関係があることが分かっている。

$$\frac{k_{est}}{k_s} = [0.5 + A \cos(\Psi/3)]^2 \quad (270^\circ \leq \Psi \leq 360^\circ) \quad (2)$$

$$\Psi = \cos^{-1}(1 - 2\phi) \quad (0 \leq \phi \leq 0.5, A = -1)$$

$$\Psi = \cos^{-1}(2\phi - 1) \quad (0.5 \leq \phi \leq 1, A = 1)$$

ここに、

$k_{est}$ : ポーラス金属構造の有効熱伝導率の推定値  $W/(m \cdot K)$

$k_s$ : ポーラス金属素材の熱伝導率  $W/(m \cdot K)$

$\phi$ : 気孔率

実際にそれを確認すべく、熱伝導率測定試験片の造形および熱伝導率測定を行った。形状は図5に示すような $\phi 12.7$ の円柱形で、2mm厚の板でラティス構造の上下を

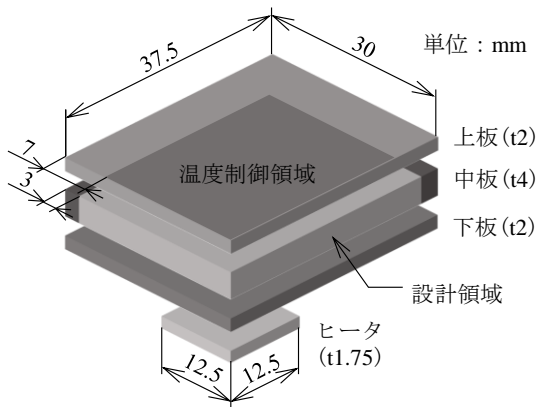


図6 解析モデル

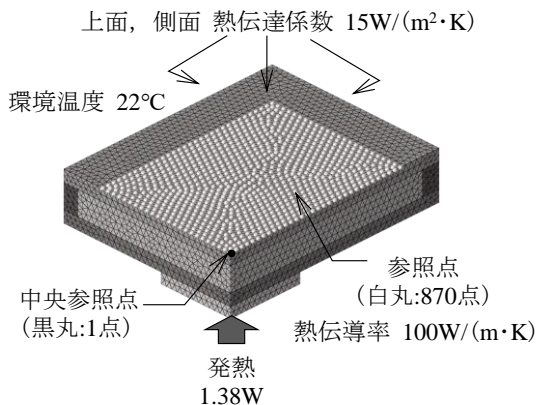


図7 解析条件

挟む形状となっており、表2のラティス条件で作製した。また、熱抵抗を熱特性測定器(Menter Graphics社製T3Ster DynTIM Tester)で測定し、有効熱伝導率を求めた。気孔率については、造形部分の体積を計測X線CT装置(Carl Zeiss社製METROTOM800)にて測定し、かさ体積をノギスによる外形測定より算出し、これらの関係から気孔率を求めた。

### 3.3 トポロジー最適化による要素密度分布の算出

伝熱プレートの面内の温度差をなるべく小さくすることを目的とした最適化を行った。図6にモデル形状を示す。対称性があることから1/4モデルとした。熱伝達により角部の温度が特に下がりやすいため、温度制御領域を外縁から7mm内側に設定した。最適化での設計領域は中板に設け、ソフトウェアの仕様上、設計領域に熱伝達の設定ができないため、外縁から3mm内側に入った領域とした。

図7に境界条件および最適化における温度参照点を示す。設計変数は中板の要素密度で、目的関数は白丸で示す870点の参照点と黒丸で示す中央参照点との温度差の二乗値の最大値を最小化することとした(MINMAX問題)。また、製造性制約は板厚方向への押し出し形状とし、中間密度が発生しやすいよう、(1)式のペナルティ係数 $p$ を1.0001、最小要素密度を造形実験の結果を反映させ0.2に設定した。

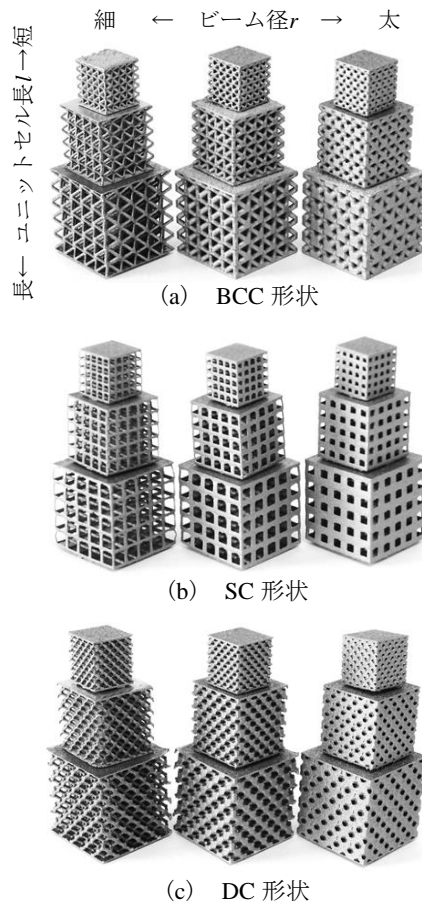


図8 造形性確認試験片

### 3. 4 領域分割による均熱化の効果の確認

図3に示すようなラティス構造への置き換えを想定し、任意の要素密度範囲毎に領域分割を行った。領域を6つに分割し、各領域における要素密度の平均値及び(1)式より熱伝導率を求めた。

また、領域分割したモデルにて伝熱解析を行い、均熱化の効果を確認した。各領域には前出の熱伝導率を定義した。ソフトウェアについてはAltair社製Optistruct 2020を使用した。

## 4 結果

### 4. 1 ラティス構造の造形性の確認

図8にラティス条件にて造形した形状を示す。すべての条件において、造形の崩れは見られず、サポートレスで概ね良好に造形できることが確認できた。また、十分に粉抜きもできることを確認した。SC形状については、最外部となる縦4辺について若干変形が認められたが、角となるためビーム断面が1/4であったことや、他の形状と比較してビーム本数も少なく、造形時の熱が逃げにくかったことが原因と考えられる。

### 4. 2 ラティス条件による有効熱伝導率測定

図9に測定値から算出した気孔率と熱伝導率比のグラフを示す。横軸の気孔率は試験体のかさ体積に対する空隙の総体積の割合で、1に近いほど空隙が占める割合が大きいことを表す。縦軸の熱伝導率比は素材の熱伝導率に

対する有効熱伝導率であり、1に近いほど素材の熱伝導率に近いことを表す。また、曲線は(2)式による値を示している。

結果を見ると、ユニットセル長 $l$ やラティス形状に関わらず、曲線付近にプロットされており、そのことから素材の熱伝導率と気孔率が分かれば、(2)式から有効熱伝導率が推定できることを確認した。

ユニットセル長とビーム径との比率 $r/l$ が等しければ、ユニットセル長が変化しても、幾何学的には気孔率は変わらない。しかし、実際に造形してみると、ユニットセル長 $l$ が小さいほど、また、気孔率が大きいほど、実際の気孔率が低下する傾向がみられる。これは、造形時に発生するスパッタの付着による影響と考えられ、正確な値を求めたい場合には、実際に造形して確かめておく必要がある。

### 4. 3 任意の熱伝導率分布による均熱化の検討

図10に最適化前の伝熱解析結果を示す。左下がヒータの直上で最大温度、右上が最小温度となり、外周ほど温度が低くなり、温度差は1.17℃となった。

これを最適化した結果が図11である。図11(a)が要素密度分布、図11(b)が最適化後の伝熱解析結果である。この結果に対しては閾値による処理をしておらず、温度差は0.13℃となった。

次に、要素密度分布毎に領域分割した場合の結果を図12に示す。図11(a)の結果を表3に示す範囲で領域分

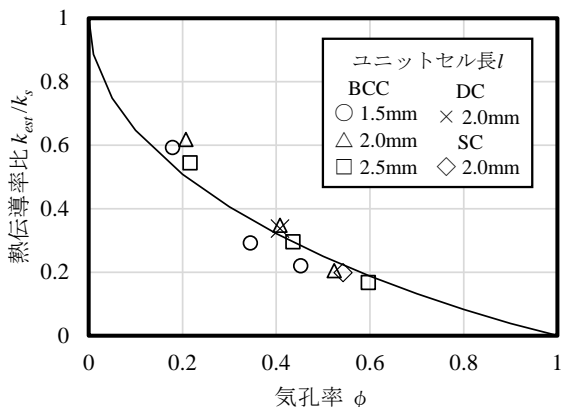


図9 熱伝導率比と気孔率の関係

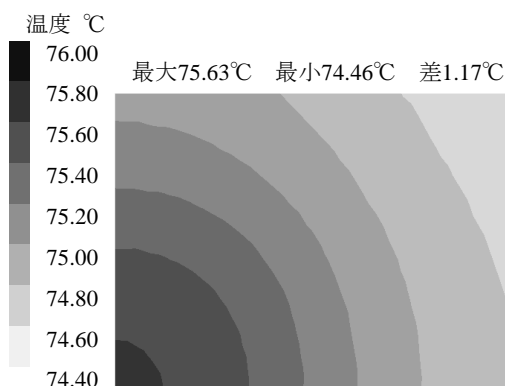
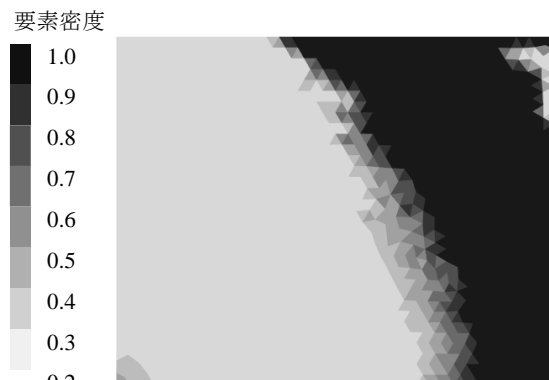
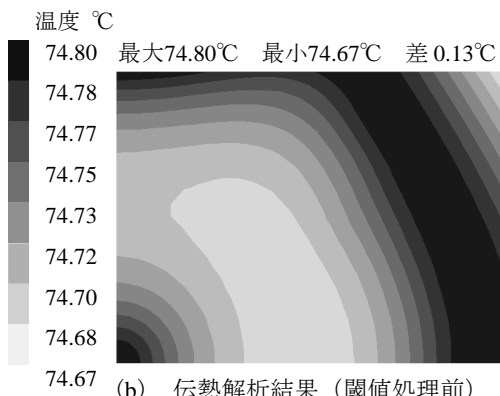


図10 伝熱解析結果(最適化前)

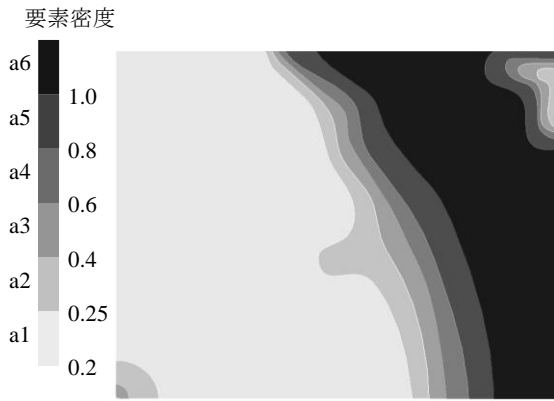


(a) 要素密度分布

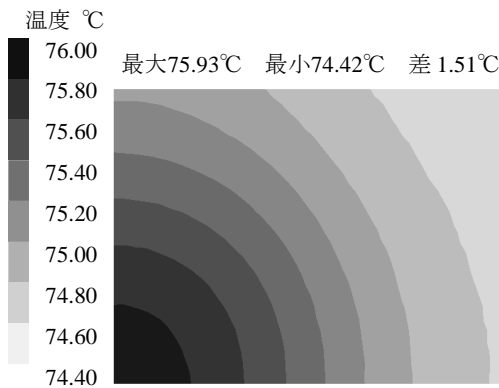


(b) 伝熱解析結果(閾値処理前)

図11 最適化解析結果



(a) 領域分割



(b) 伝熱解析結果

図 1 2 領域分割後の伝熱解析結果

表 3 領域分割と熱伝導率

領域名	範囲	熱伝導率 W/(m·K)
a1	$0.2 \leq \rho < 0.25$	20.2
a2	$0.25 \leq \rho < 0.4$	31.4
a3	$0.4 \leq \rho < 0.6$	49.3
a4	$0.6 \leq \rho < 0.8$	69.9
a5	$0.8 \leq \rho < 1.0$	100
a6	$\rho = 1.0$	100

割したのが図 1 2 (a)である。この熱伝導率の最大値、最小値については、ラティス構造で造形可能な条件を参考に設定した。各領域に熱伝導率を定義し、伝熱解析した結果が図 1 2 (b)である。温度差は1.51°Cとなり、図 1 0 の最適化前と比較して、かえって均熱性が低下してしまう結果となった。

また、図 1 3 に、閾値0.4未満(領域a1, a2)を部材なしとした解析結果を示す。温度差は0.4°Cとなり、図 1 2 (b)と比較すると、均熱性が良いことが分かる。

さらに、図 1 4 に領域a1, a2の熱伝導率を変化させ、それ以外を素材の熱伝導率100W/(m·K)に固定した場合の温度差の結果を示す。熱伝導率が極めて0に近いと温度差が小さいが、熱伝導率が増加すると急激に温度差が大きくなり、その後わずかに減少していく傾向がみられる。この結果から、部材なし、すなわち熱伝導率が0の部分で

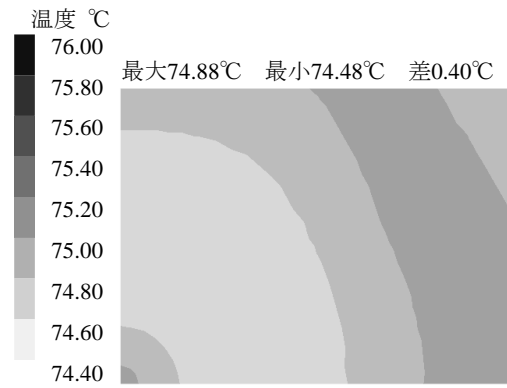


図 1 3 伝熱解析結果( $\rho < 0.4$ を部材なし)

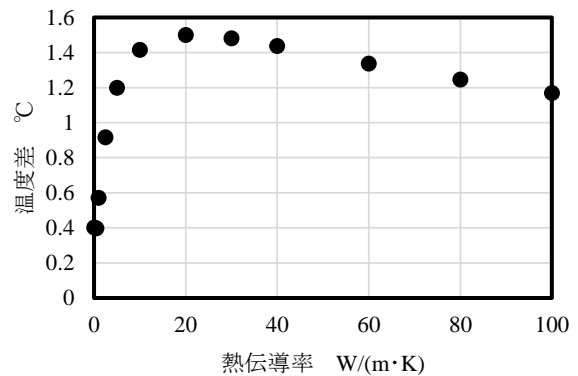


図 1 4 領域 a1, a2 の熱伝導率と温度差の関係

熱伝導率がある部材に置き換えることは、均熱化の観点から適切ではないと推測される。

一つの考察として、部材なしの部分は熱を伝わりにくくしているのではなく、熱の伝達経路を変える役目があると考えられる。ヒータ直上から少し離れた外周寄りに熱源が移動することで、中央と外周の温度が均一に近い状態になると推測される。部材なしの部分に熱伝導率が小さい部材(ただし、熱伝導率が限りなく0に近い場合を除く)を配置した場合、その領域は熱が伝わりにくいだけで、結局空洞がない場合と同じ伝達経路で熱が伝わるため、均熱性が良くなると考えられる。

一方、図 1 1 (a)の結果では、a1の領域の要素密度が0でないのにも関わらず、図 1 1 (b)のような良好な結果となったのが疑問に残るが、プログラム上でどのような処理がされているかがブラックボックスとなっているため、今後プログラムのアルゴリズムや理論などを深く理解する必要がある。

本来であれば、分割した領域をラティス構造に置き換えし、試作・実験による検証を行う予定であったが、伝熱解析による領域分割の均熱化への有効性が認められなかったため、実験による検証については断念した。

## 5 おわりに

本研究では既報の伝熱プレートにおける課題であった空洞部の解消とさらなる均熱化を図るため、ラティス構

造の置き換えによる検討を行い、以下のことが分かった。

- (1) 金属積層造形装置にてAlSi10Mgを用いてラティス構造の造形を行い、最大4mmのユニットセル長でも、サポートレスで問題なく造形できることを確認できた。
- (2) ラティス構造の有効熱伝導率測定を行い、ポーラス構造における気孔率と熱伝導率比の関係式に倣うことが分かった。またそれにより、ラティス条件を変えることで任意の有効熱伝導率をもった部材が製造可能であることが分かった。
- (3) 領域分割し、各領域に熱伝導率を定義する方法でさらなる均熱化ができるか検討したが、有効性は認められなかった。

今回は、均熱性に関しては有効性を見出すことができなかったが、今後は得られた知見を基に、別の方法により、構造内部にラティス構造を適用し温度制御する方法について検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 佐藤真ほか. トポロジー最適化による伝熱プレート  
の表面温度の均一化. 長野県工技センター研報. 14,  
p.M51-M54 (2019)
- 2) JIS H7903:2008 ポーラス金属の熱伝導率試験方法,  
p.6-7
- 3) JIS H7009 : 2016 ポーラス金属用語