ラティス体積分率分布最適化と金属積層造形による 傾斜機能構造体の温度分布設計*

宇恵野 章^{**}, ^{***} Guo Honghu[†] 森豊亮太^{***} 竹澤晃弘[†] 北村 充^{***}

Temperature Distribution Design of Functionally Graded Structure Based on Lattice Volume Fraction Distribution Optimization and Metal Additive Manufacturing

Akira UENO, Honghu GUO, Ryota MORITOYO, Akihiro TAKEZAWA and Mitsuru KITAMURA

In recent years, additive manufacturing (AM) has been used in industrial products for fabricating complex geometry. On the other hand, topological optimization is a suitable method for designing complex geometry. Therefore, there are many studies of combining AM and topological optimization these days. As a variant of topological optimization, density optimization of lattice structure is recently studied. The lattice structure is a characteristic one that includes void inside structure fabricated by AM. The designed model by topological optimization should be modified for a suitable structure for AM process. This research tried to use lattice volume fraction optimization for an industrial AM product. Firstly, we have developed a method of designing the lattice unit cell that its effective thermal conductivity is controlled by design variables. Effective thermal conductivity of lattice is calculated by homogenization method and finite element method (FEM). It was confirmed that the effective thermal conductivity changes depending on the size of the internal pores. Next, we consider the minimization problem of the surface temperature of the target domain. By lattice volume fraction optimization, the uniformity of the surface temperature of the target domain was improved. In addition, we fabricated test pieces of lattice and 3D example model by using selective laser melting additive manufacturing. The results showed that the error between the measurement and the analysis using the test piece was sufficiently small.

Key words: Lattice unit cell, Additive manufacturing, Thermal conduction, Topology optimization, Finite element method

1. 結 言

高温環境の生産プロセスで用いられる金型や機械設備などにおいて、構造体内部および表面の温度分布制御は構造体の変形抑制や生産品質制御等の観点で重要であり、これまで多くのエンジニアリング的な対策が検討されてきた。例えば、誘導加熱を用いた手法¹⁾、蒸気加熱を用いた手法²⁾等がある。しかし、これらの手法は熱をあえて加えることにより、能動的に金型の表面温度を制御可能であるものの、機構が複雑になり金型のコスト増は避けられない。他方、近年、積層造形 (Additive Manufacturing) 技術³⁾の普及が急速に進み、樹脂のみならず、高強度・高熱伝導率の金属材料においても微細な造形が可能になっている。また、内部の空孔を含むような複雑構造の形成を得意とすることから、金型や熱機関部品の高効率冷却や、熱交換器への応用が盛んに検討されている⁴⁾。このような金型の利点としては、内部の熱伝導や冷却構造を自由に設計することができ、先に述べた能動的な制御技術を導入せずとも、金型の温度を意図的に設計できる点がある。

積層造形においては造形物の形状自由度が従来法と比較し飛躍的に向上しており、その設計法についても、抜本的に見直されている。設計手法の一つとして、数値計算を活用し、優れた最適構造を導出するという構造最適化法の導入が考えられる。特にトポロジー最適化⁵⁾は熱伝達率最大化問題⁶⁾のような熱に

関する適用例が多い。更に、近年は積層造形装置で最適構造を実際に造形し熱性能を実験検証した報告例が増加している⁷⁾。しかし、トポロジー最適化により導出された最適構造を積層造形装置で造形する際には、積層造形装置の造形則に起因する設計制約を踏まえた形状変更が必要である点が課題である⁸⁾。

他方、積層造形特有の構造として、内部に気孔を導入したラティス構造がある³⁾。ラティス構造は気孔形状を工夫することにより、汎用的な多孔質構造に比べ軽量高剛性⁹⁾や軽量高熱伝導率¹⁰⁾の特性を実現できる。また、ラティス形状を局所的に変化させることにより、傾斜機能材料に似た性能を持たせることもできる¹¹⁾。このような傾斜機能ラティス構造はトポロジー最適化に極めて類似の最適化アルゴリズムで設計でき、これまで軽量化時の剛性最大化¹²⁾や振動特性の改善¹³⁾から始まり、近年では高効率冷却構造¹³⁾¹⁴⁾への適用が報告されている。しかし、傾斜機能特性を用いて緻密な熱設計が可能であるにもかかわらず、表面温度の均一性を狙った構造は未だ提案されていない。

そこで本研究では、工業分野において需要が多い、加熱物体の表面温度均一化を狙い、ラティス構造のユニットセル検討から大型部材の造形まで精度や実用面の課題を一貫して検証することを目的とする。すなわち、ラティス体積分率分布最適化を熱伝導率の最適化問題に展開するとともに、金属積層造形装置で実際にユニットセルと最適構造を造形し、造形物の性能評価を行った。以下2章では熱伝導解析及び最適化問題を定式化する。3章ではラティスユニットセルの実効的熱伝導率を数値計算により求め、4章ではその実験検証を行う。5章では金型を模した構造に対してラティス体積分率分布最適化を行う。6章では最適構造を金属積層造形装置で造形した後、内部形状をCTスキャンで測定し、本設計手法の妥当性と製作性を評価する。

* 原稿受付 令和3年6月3日

掲載決定 令和3年7月15日

** AGC (株) (神奈川県横浜市鶴見区末広町1-1)

*** 広島大学 大学院工学研究科 (広島県東広島市鏡山1-4-1)

† 早稲田大学 基幹理工学部 (東京都新宿区大久保3-4-1)

2. 定式化

本研究では、等方性の熱伝導率を持つ金属材料から構成されるラティスユニットセルの熱伝導問題および、設計領域 Ω におけるユニットセルの体積分率分布最適化を扱う。それぞれの状態方式と最適化問題について以下に述べる。

2.1 ラティスユニットセルの状態方程式

本研究で用いるユニットセルの基準形状を図1に示す。ユニットセルは立方体構造であり、内部に熱伝導率制御のための立方体状の空孔を有している。この検討において、温度境界 Γ_1 から入熱を受ける設計領域 Ω の状態方程式は、次の式で表される。

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot (\lambda \nabla T) &= 0 \text{ in } \Omega \\ T &= T_0 \text{ on } \Gamma_1 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 T は温度、 λ は熱伝導率、 T_0 は温度境界 Γ_1 での温度である。なお、問題を簡略化し、熱伝導問題に対するトポロジー最適化で用いられるように、熱輻射の影響は無視するものとした¹⁵⁾。

2.2 ラティスユニットセルの実効熱伝導率の計算

ユニットセルの実効熱伝導率テンソル λ^* は、セルの巨視的なエネルギーの総和と局所的なエネルギーの総和が等しいことを示す式 (2) より、直接計算して求められる¹⁶⁾¹⁷⁾。

$$\frac{1}{2} \lambda^* \overline{\nabla T} \cdot \overline{\nabla T} = \frac{1}{2} \int \lambda \nabla T \cdot \nabla T dx \quad (2)$$

ここで、 $\overline{\nabla T}$ はユニットセル全体の温度勾配、 ∇T は局所的な温度勾配である。 λ_{11}^* は式 (2) より、 $\overline{\nabla T}_1 \neq 0.0$ かつ $\overline{\nabla T}_2 = \overline{\nabla T}_3 = 0.0$ で示される境界条件での計算によって導出できる。 λ_{22}^* および λ_{33}^* の導出も同様である。本研究では、ディリクレ境界条件として温度勾配を与える際は、 $\overline{\nabla T}_i = 1.0$ となるよう対面する境界に対し片面に $T=1.0$ を、対面に $T=0.0$ を設定した。周期的境界条件を与える際は $\overline{\nabla T}_i = 0.0$ とした。

また、セル内部の立方体状の空孔の1辺の長さ D を設計変数 d ($0 \leq d \leq 1.0$) と対応するように定式化し、設計変数毎に実効熱伝導率を算出した。

2.3 ラティス体積分率分布最適化の状態方程式

次に2.2節で定義したユニットセルを用いて、設計領域 Ω 内のラティス体積分率分布の最適構造を導出する。導出にあたり、構造内部の熱伝導問題は式 (1) の状態方程式を用いるとともに、設計領域 Ω の外表面と周囲環境との熱交換について、対流熱伝達および輻射の影響も考慮する。そのため、温度境界 Γ_2 における設計領域 Ω の状態方程式は、次の各式で表される。

$$\begin{aligned} -nh(T - T_{\text{amb}}) &= q \text{ on } \Gamma_2 \\ -n\varepsilon\sigma(T_{\text{amb}}^4 - T^4) &= q \text{ on } \Gamma_2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 T_{amb} は外部参照温度、 h は対流熱伝達率、 ε は設計領域 Ω 表面の放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数、 q は温度境界 Γ_2 で対流もしくは輻射により入出する熱量である。また、温度境界 Γ_2 には対流、輻射両者の境界条件を設定する。

Fig.1 Boundary conditions of lattice unit cell

2.4 ラティス体積分率分布最適化問題

ラティス体積分率分布の最適化においては、設計領域 Ω 内をユニットセルで分割した後、目標関数に従いその最適体積分率分布を導出する。ここで本方式をトポロジー最適化のアルゴリズムと比較する。SIMP 法¹⁸⁾を用いたトポロジー最適化では設計領域に0から1の連続関数で表される密度関数を定義する事で連続問題に置き換える。一方でラティス体積分率最適化においても、最適化対象となるユニットセルの特性を、設計変数 d ($0 \leq d \leq 1.0$) に対応させることが可能である。このため、ラティス体積分率分布最適化はトポロジー最適化と類似のアルゴリズムでの設計が可能であるといえる¹⁹⁾。

本研究では、このラティス体積分率分布最適化により、熱伝導特性を持ち、参照平面の温度を任意に制御する構造を算出する。例題として、参照平面の温度分布の最小化問題を扱う。参照平面の任意の点における温度 T と参照平面全体の平均温度 $\bar{T}$ との差を最小二乗法で求め、ラティス体積分率分布最適化で最適化構造を得る。このときの目標関数は、以下の式 (4) で表される

$$\begin{aligned} \text{minimize } f &= \int (T - \bar{T})^2 dx \\ \text{subject to} \\ \text{Eqs. (1), (2) and (3)} \\ 0 &\leq d \leq 1.0 \end{aligned} \quad (4)$$

なお、ラティス体積分率分布の最適化過程において、設計領域内の体積分率はバルク状態に対して減少する為、機械的な強度は制約を設けない限りは低下すると想定される。今回は強度低下が許容される用途を想定し検証を進めるが、機械的な物性値が重要な用途へ本技術を展開する際は考慮する必要がある。

3. ユニットセルの数値例

次に、2章で定義したユニットセルの設計変数と実効熱伝導率の相関を算出し、本計算方法の妥当性を評価した。ユニットセルは2.2節で示した構造を元に設計し、セル外形の1辺を5.0mmとした。内部の立方体空孔の1辺の長さ D ($1.0\text{mm} \leq D \leq 4.5\text{mm}$) を設計変数 d ($0 \leq d \leq 1.0$) と対応するよう $D = 4.5 - 3.5d$ の式に基づき制御し、設計変数を0.1ステップ毎に変化させながら実効熱伝導率を算出した。この立方体状空孔の1辺の長さについては、金属積層造形装置での造形に必要な最低限の壁厚を維持することを考慮し、上限値を設定した。また、本研究では、評価用の試験片の作成にあたりレーザー焼結式の金属積層造形装置を用いるが、この方式ではレーザーにより金属粉末を選択的に熔融させて造形するため、ラティス構造等を作成する際には、構造体の未熔融の粉体を造形後に除去する必要がある。よって、今回設計するユニットセルにおいても、未熔融粉体除去用の粉抜き穴を設計し、この穴径1.0mmおよび2.0mmの2ケースにて、実効熱伝導率の制御範囲を評価した (図2)。材料はSUS316-Lを想定し、熱伝導率 $\lambda_0 = 16.7\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ とし

Fig.2 Basic shape of the lattice unit cell (a) Powder remove hole=1.0mm (b) Powder remove hole=2.0mm

た。また有限要素法解析 (Finite Element Analysis: FEA) の際は、商用ソフトの COMSOL Multiphysics (COMSOL AB 社, スウェーデン) を用いた。

各条件における設計変数と実効熱伝導率の相関を図 3 に示す。粉抜き穴径 1.0mm の場合、設計変数 $0 \leq d \leq 1.0$ に対して、実効熱伝導率は $3.0 \leq \lambda \leq 14.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ の範囲で制御することができた。一方、粉抜き穴径 2.0mm の場合は、設計変数 $0 \leq d \leq 1.0$ に対して、実効熱伝導率は $2.3 \leq \lambda \leq 8.9 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ の範囲での制御となった。いずれのケースも、内部空孔が粉抜き穴径を回る設計変数以降では、実効熱伝導率が一定となった。同一の設計変数に対して実効熱伝導率の制御範囲が異なるのは、粉抜き穴による金属部の体積減少量の差異が影響したと推察される。この点を踏まえ、ユニットセルのバルク状態を 1.0 とした際、体積分率のみで実効熱伝導率が求められるかを検証するため、各粉抜き穴径におけるユニットセルの金属部の体積分率と実効熱伝導率の相関を確認した (図 4)。その結果、各条件の近似曲線から、同一の体積分率であっても粉抜き穴径が異なると実効熱伝導率に差異が生じることが確認された。これは粉抜き穴径が大きい方が、同一体積においても孔周辺の断面積が小さくなり、熱抵抗が大きくなるためだと考えられる。以上の結果から、ユニットセルの熱伝導率を算出する際には、ユニットセルの体積分率のみでなく、トポロジーを考慮した設計変数を設定する事が妥当であると判断した。

Fig.3 Simulated and measured results of effective thermal conductivity with respect to the design variable
Approximation of simulated result of powder remove hole 1.0mm: $\lambda = -2.440d^3 - 6.376d^2 + 19.860d + 2.976$, $R^2 = 1.000$
Approximation of simulated result of powder remove hole 2.0mm: $\lambda = -1.040d^3 - 10.097d^2 + 16.404d + 2.300$, $R^2 = 0.999$

Fig.4 Simulated and measured results of effective thermal conductivity with respect to volume fraction
Approximation of simulated result of powder remove hole 1.0mm: $\lambda = -13.007d^3 - 12.978d^2 + 17.201d - 0.872$, $R^2 = 0.999$
Approximation of simulated result of powder remove hole 2.0mm: $\lambda = -13.012d^3 - 10.208d^2 + 13.720d - 0.463$, $R^2 = 1.000$

4. ユニットセルの能力評価

次に、3 章でのユニットセルの解析結果の妥当性を評価するため、レーザー焼結式の金属積層造形装置を用い、ユニットセルから構成される試験片を積層造形した後、試験片の熱伝導率を測定し解析結果との差異を確認した。熱伝導率の測定には温度傾斜法を用いた。図 5 に示す通り、温度傾斜法では試料の片面を加熱、反対面を冷却し、試料の厚み方向に定常状態の温度勾配を設け、その輸送熱量と温度差から熱伝導率を算出する。本測定方法は定常法であり、多層材や複合材等の熱伝導率測定にも適用できることから、内部に空孔を持つ本研究のユニットセルの測定に適している。また、試験片の表面粗さの影響を排除するため、表面に熱伝導グリースを塗布して熱伝導率測定を行った。グリースによる熱伝導率測定値への影響については、塗布量とグリースの熱伝導率から差分を算出し、試験片の熱伝導率算出に反映させた。

試験片は本測定方法の制約を踏まえ、図 6 に示す通り、ユニットセルから構成される $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 10\text{mm}$ の大きさとした。各ユニットセルは 3 章と同様に外形の 1 辺を 5.0mm とした上で、表 1 に示す 3 水準を用意し、それぞれ粉抜き穴の穴径の影響、および粉抜き穴径 2.0mm における熱伝導率の制御範囲について評価した。3 章の数値例による検討と同様に、材料は SUS316-L の粉体 ($d_{50}: 36\sim 39 \mu\text{m}$) を用いるとともに、装置については Matsuura LUMEX Avance-25 を用いた。

各試験片の評価結果を表 1 に示す。まず、実際に造形された試験片の重量を設計値と比較したところ、造形体の方が設計値に対し 2.0%~10.0% 重くなることが確認された。表 2 に各試験片の外形形状の写真を示すが、大きな崩れや割れ等は確認されなかったものの、ユニットセルの断面や粉抜き穴を観察すると、内部壁面への粉体付着や粉抜き穴の歪み等が確認されたことから、これらが重量増大に寄与したと考えられる。

次に、熱伝導率について実測値と解析結果を比較したところ、実測値の方が 3.0%~11.1% 高くなる結果が得られた。この実測値と解析結果の差異については、3 章の解析結果において、ユニットセルの体積分率の増大に伴い熱伝導率が増加した点を踏まえると、実際の造形体で確認された設計値に対する重量増大が、熱伝導率の実測値増大に寄与したためと想定される。一方で、積層造形により製作された構造体は、ミクロな空孔や結晶状態による熱伝導率の変動することが先行研究で確認されている¹⁹⁾。今後、本開発手法の精度向上に向けては、上記要因が各ユニットセルの熱伝導率の実測値へ及ぼす影響について精査することも有効だと考えられる。

Fig.5 An outline of the experimental equipment for effective thermal conductivity measurement

Fig.6 Schematic of test piece for effective thermal conductivity measurement

Table 1 Summary of measured and simulated effective thermal conductivities

Sample No	A	B	C
Powder remove hole mm	1.0	2.0	2.0
Simulated weight g	39.0	33.0	91.3
Measured weight g	40.9	36.3	93.1
Simulated value of effective thermal conductivity W/(m·K)	3.0	2.3	8.4
Measured value of effective thermal conductivity W/(m·K)	3.1	2.6	9.4
Error over the simulated value %	3.0	8.7	11.1

Table 2 General view and side view of test piece

Sample No	General view	Side view
A		
B		
C		

図3および図4に示した通り、実測値および解析結果共に、体積分率に対する熱伝導率の相対的な優位性比較は可能である事が確認できた為、3章での解析結果の妥当性を確認するとともに、本研究のユニットセル設計手法が構造最適化用途として使用可であると判断した。

5. 最適構造の数値例

次に、3章および4章で設計したユニットセルを用いて、図7に示す構造体の参照平面における温度分布を最小化する最適構造を導出した。解析モデルは内部に熱源を有する構造体の1/4対称モデルであり、参照平面として構造体の上面を選定した。解析にあたり、最適構造との比較用のリファレンスとして、設

Fig.7 Analysis domain of 3D numerical example

計領域がバルク材料から構成される構造体の参照平面温度分布も計算した。材料はユニットセルと同様にSUS316-Lを想定し、熱伝導率 $\lambda_0 = 16.7\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ とした。また、金型等の工業用途において特定箇所の参照温度を制御する装置が多い点を踏まえ、熱伝導問題ではリファレンスと最適構造共に、参照平面内の最高温度が 130.0°C 相当の 403.2K となる条件下で温度分布を評価した。この参照平面内の最高温度調節のため、構造体内部の熱源の入熱量を $5.8\sim 6.2\text{W}/\text{cm}^2$ の範囲で設定した。熱源の設置位置は構造体中央より下部としたが、この理由は、実運用下では設計制約により熱源の位置にも制約が生じる事があり、それが温度分布の不均一性の原因となる課題を想定したためである。また構造体は自然対流条件下の常温環境に設置される事を想定し、構造体の外表面と周囲との対流熱伝達について、 $h=10\text{W}/\text{m}^2$ および $T=293.2\text{K}$ を与えた。また、周辺環境への熱輻射を想定して構造体の放射率 $\epsilon=0.94$ および $T=293.2\text{K}$ を与えた。この際、構造体の放射率の値については、実測時に表面性状や酸化程度の影響を排除するために黒体塗料を塗る前提で設定した。構造体下面については断熱条件とした。また構造体の外表面から厚み 2.0mm 分は設計領域から除外した。設計領域は3章および4章で設計された外形一辺 5.0mm かつ粉抜き穴径 2.0mm のユニットセルから構成され、ユニットセルの熱伝導率は設計変数と実効熱伝導率の近似式をもとに算出した。構造最適化にあたり設計変数の初期値は、複数条件を検討した上で目標関数である温度分布が最も改善した $\rho=0.5$ とした。粉抜き穴径 2.0mm のユニットセルを選定した理由としては、4章での金属積層造形試験片の重量測定において、設計値よりも実測側で重量過多であったことから、より大型の部材を製作することを踏まえ、内部の残留粉体を除去しやすくすることを考慮したためである。

図8に示す通り、最適化における目標関数の収束履歴は滑らかに収束し、30回以上の反復回数で目標関数に変化が見られなくなったため収束と判断した。次に、リファレンスと最適構造の熱伝導率分布および参照平面の温度分布の計算結果を表3に示す。リファレンスでは、設計領域内の熱伝導率分布が一定条件下であるため、熱源からの距離に近い参照表面の温度が高くなり、熱源から遠く放熱源である壁面に近い表面ほど温度が低くなる結果が得られた。一方で、熱伝導率分布最適化後には、熱源近辺の設計領域の熱伝導率を下げると共に、熱源から離れた設計領域の熱伝導率を上げることで、温度分布の均一性が向上することが確認された。具体的な参照平面内の温度差は、リファレンスで 9.7K あったのに対し、最適化後で 7.1K となり、約30%の改善効果が確認された。

次に最適構造について 3D モデル化を行った。手順としては、最適化計算結果の各ユニットセルに格納されている設計変数を抽出してデータテーブルを作成後、その情報を基に COMSOL Multiphysics でモデリングした (図 9 (a))。この 3D モデルを用いて、前述の最適化計算と同様の境界条件を与えて解析を行い、モデリングの妥当性を検証した。その結果、表 3 の最適化計算では参照平面内の温度差が 7.1K であったのに対し、3D モデルによる解析結果 (図 9 (b)) ではほぼ同等の 7.3K となった。以上の結果により、本章で検討したユニットセルの実効熱伝導率の近似式を用いた最適構造の計算方法と、その計算結果を用いた 3D モデル化工程の妥当性が確認された。

Fig.8 Convergence history of objective function for the 3D example

Table 3 The simulated results of design variable distribution and temperature distribution each of reference and optimized

	Reference	Optimized
Thermal conductivity distribution		
Temperature distribution of target surface		
Maximum temperature of target surface K	403.2	403.2
Minimum temperature of target surface K	393.5	396.2
Temperature difference of target surface K	9.7	7.0

Fig.9 Simulated results of full-scale model. (a) Full-scale model of optimized structure. (b) Simulated results of surface temperature distribution of (a)

6. 最適構造の製作性評価

次に、5章で設計したラティス体積分率分布最適化後のモデルデータについて、レーザー焼結式の金属積層造形装置で造形した後、内部の製作精度について CT で測定し、本開発手法を大型部材に展開する上での製作性について評価した。モデルデータは図 10 に示す通り、5章の 1/4 対称モデルでの最適化結果をフルモデル化したものを用いた。造形材料は、ステンレス系を用いるとともに、金属積層装置は 3D Systems 社 ProX300 を用いた。CT 機器は Baker Hughes 社 vltomelx m300 を使用した。また、CT 測定時は測定可能サイズの兼ね合いから、造形体の一部をワイヤー放電にて切り出した上で観察した。

図 11 に造形体の外観写真を示す。外形状は割れや粉抜き穴の閉塞など無く製作出来ていると確認出来た。次に、CT 撮影による造形体内部形状の観察結果を示す。図 12 は粉抜き穴の観察結果だが、モデルデータである緑色の線と造形物の偏差は 0.1mm 程度であった。レーザー焼結式の金属積層造形の形状精度は ±0.1mm 程度との報告²⁰⁾を踏まえ、本造形は標準的な精度での製作に成功したと判断出来る。次に同様にユニットセルの角柱部についても CT で確認したところ、角の一部で 0.2mm 程度の偏差傾向が確認された (図 13)。精度のレンジとしては、上記の報告と同程度ではあるものの、一律で不足傾向である為、角部の面取り等の修正により、今後改善を進める。

次に CT 撮影による欠陥解析の結果を図 14 に示す。造形体内部には体積 0.01mm³ の空孔 (図 14 青色) が点在し、一部直径 0.2mm 程度の欠陥も確認出来るが、大きな断裂等は撮影範囲内では確認されなかった。これらの空孔体積を集計し、母材と空孔の体積比率を確認したところ、造形品の充填率は 99.6% であり、緻密な構造体が得られていることが確認できた。上記の評価により、本開発手法で設計された最適構造体はレーザー焼結式金属積層造形機で高い製作性で造形可能だと判断した。

Fig.10 Test piece for demonstration experiment

Fig.11 Picture of fabricated test piece by metal additive manufacturing. Picture model was painted by black body spray

Fig.12 X-ray images of cross section of powder remove hole

Fig.13 X-ray images of cross section of inner pore

Fig.14 X-ray images of distribution of pore defect

7. 結 言

本研究では、ラティス体積分率分布最適化を熱伝導率の最適化問題に展開するとともに、金属積層造形装置で実際にユニットセルおよび最適構造を造形し実験検証を行った。以下に結果を記す。

- (1) まず、均質化法を用いて熱伝導率制御ラティスのユニットセルを設計した。立方体状の内部空孔と粉抜き用の貫通穴を有する構造とし、内部空孔の大きさを設計変数に設定し実効熱伝導率との相関を FEA で求めた。
- (2) 次にレーザー焼結式の金属積層造形装置を用いて、1 で設計したユニットセル構造を造形し、製作性に問題が無いことを確認した。また製作した構造体について重量測定および温度傾斜法による熱伝導率測定を行い、解析結果に対して 10% 程度差異があることを確認した。
- (3) 次に、ラティス体積分率分布の最適構造を、加熱物体の表面温度均一化を目標関数として導出した。解析の結果、最適化前の一様な熱伝導率分布の状態では熱源からの距離に応じて温度差が生じていたのに対し、最適化後の結果

では熱源近辺の熱伝導率を下げることで高温部の温度を低下させると共に、熱源から離れた設計領域の熱伝導率を上げることで温度分布の均一性が向上することが確認された。

- (4) さらに、上記で得られた構造体をフルモデル化した上で、レーザー焼結式の金属積層造形装置を用いて造形し、造形体の内部構造を CT スキャンで評価した。その結果、粉抜き穴やユニットセル等については 0.2mm 以内の精度で造形されている事と、造形品の充填率も 99.6% を達成している事を確認した。よって、本開発手法で設計された最適構造体はレーザー焼結式金属積層造形機で高い製作性で造形可能だと判断した。

今後は、製作した最適構造体の温度分布測定などの能力確認を進める予定である。さらに、本設計手法の設計精度と実用性を高めるために、ユニットセルの内部トポロジーや結晶性などの影響を精査し、積層造形時の誤差を設計およびオペレーションで改善した上で、設計手法への反映を検討予定である。

また、本設計手法の用途拡大を見据え、今回検討した温度分布の最小化に加え、熱変形の最小化との両立についても検討を進める予定である。

参 考 文 献

- 1) M. Jeng, S. Chen, P. Minh, J. Chang and C. Chung: Rapid mold temperature control in injection molding by using steam heating, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 30 (2010) 1295.
- 2) G. Wang, G. Zhao, H. Li and Y. Guan: Research of thermal response simulation and mold structure optimization for rapid heat cycle molding processes, respectively, with steam heating and electric heating, *Materials & Design*, 31 (2010) 382.
- 3) I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker: *Additive Manufacturing Technologies*, Springer-Verlag (2010).
- 4) J. Kang, H. Shangquan, C. Deng, Y. Hu, J. Yi, X. Wang, X. Zhang and T. Huang: Additive manufacturing-driven mold design for castings, *Additive Manufacturing*, 22 (2018) 472.
- 5) M. P. Bendsøe and O. Sigmund: *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, Springer-Verlag (2003).
- 6) 伊賀淳郎, 西脇眞二, 泉井一浩, 吉村允孝, 設計変数依存性を考慮した熱伝達問題に対するトポロジー最適化, *日本機械学会論文集 C 編*, 74, 746 (2008) 2452.
- 7) T. Dbouk: A review about the engineering design of optimal heat transfer systems using topology optimization, *Applied Thermal Engineering*, 112 (2017) 841.
- 8) L. Meng, W. Zhang, D. Quan, G. Shi, L. Tang, Y. Hou, P. Breitkopf, J. Zhu and T. Gao: From topology optimization design to additive manufacturing: today's success and tomorrow's roadmap, *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27 (2020) 805.
- 9) Y. Koizumi, A. Okazaki, A. Chiba, T. Kato and A. Takezawa: Cellular lattices of biomedical Co-Cr-Mo-alloy fabricated by electron beam melting with the aid of shape optimization, *Additive Manufacturing*, 12B (2016) 305.
- 10) A. Takezawa, M. Kobashi, Y. Koizumi and M. Kitamura: Porous metal produced by selective laser melting with effective isotropic thermal conductivity close to the Hashin-Shtrikman bound, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 105 (2017) 564.
- 11) L. Cheng, P. Zhang, E. Biyikli, J. Bai, J. Robbins and A. To: Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation, *Rapid Prototyping Journal*, 23, 4 (2017) 660.
- 12) X. Wang, P. Zhang, S. Ludwick, E. Belski and A. To: Natural frequency optimization of 3D printed variable-density honeycomb structure via a homogenization-based approach, *Additive Manufacturing*, 20 (2018) 189.
- 13) A. Takezawa, X. Zhang, M. Kato and M. Kitamura: Method to optimize an additively-manufactured functionally-graded lattice structure for effective liquid cooling, *Additive Manufacturing*, 28 (2019) 285.
- 14) A. Takezawa, X. Zhang, M. Kato and M. Kitamura: Optimization of an additively manufactured functionally graded lattice structure with liquid cooling considering structural performances, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143 (2019) 118564.

- 15) A. Takezawa, G. H. Yoon, S. H. Jeong, M. Kobashi and M. Kitamura: Structural topology optimization with strength and heat conduction constraints, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **276**, 1 (2014) 341.
- 16) Z. Hansin: Analysis of composite materials: a survey, *Journal of Applied Mechanics*, **50**, 3 (1983) 481.
- 17) R. Hill: On constitutive macro-variables for heterogeneous solids at finite strain, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, **326**, 1565 (1972) 131.
- 18) M. P. Bendsøe and O. Sigmund: Material interpolation schemes in topology optimization, *Archive of Applied Mechanics*, **69**, 9 (1999), 635.
- 19) T. Kimura and T. Nakano: Thermal and mechanical properties of commercial-purity aluminum fabricated using selective laser melting, *mechanical transactions*, **58**, 5 (2017) 799.
- 20) C. Grunert, R. Miriko, E. Lopez and A. Marquardt: Comparison of dimensional accuracy and tolerances of powder bed based and nozzle based additive manufacturing processes, *Journal of Laser Applications*, **32**, 3 (2020) 032016.