

高温生産プロセス向け Design for
Additive Manufacturing 構築に関する研究

(Development of design for additive manufacturing in high
temperature manufacturing process)

2021年9月

宇恵野 章

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 工業分野における付加製造技術の活用動向.....	2
1.1.2 AM 技術の分類.....	4
1.1.3 構造最適化技術の分類と開発動向.....	10
1.1.4 Design for Additive Manufacturing について.....	12
1.1.5 付加製造技術の高温生産プロセスへの展開.....	15
1.1.6 ラティス体積分率分布最適化.....	17
1.2 本研究の目的.....	18
1.3 本論文の構成.....	18
第2章 高温プロセス向けの構造最適化と付加製造技術	20
2.1 高温生産プロセスにおける構造最適化設計の取り組み.....	20
2.2 ラティス体積分率分布最適化の熱関係への展開.....	21
2.3 結言.....	26
第3章 RVE 法を用いた熱伝導率制御ラティスユニットセルの設計手法	28
3.1 ラティスユニットセルの基本設計.....	28
3.1.1 ラティスユニットセルの状態方程式.....	28
3.1.2 ラティスユニットセルの実効熱伝導率の定式化.....	29
3.1.3 ユニットセルの粉抜き穴の設計.....	30
3.1.4 ユニットセルの壁厚の設定.....	30
3.2 数値例.....	31
3.2.1 立方体状の内部空孔のユニットセル.....	31
3.2.2 球状の内部空孔のユニットセル.....	34
3.2.3 ユニットセルのスケールアップ.....	36
3.3 異方性ユニットセルの設計.....	37

3.4 結言	39
第4章 金属付加製造による熱伝導率制御ラティスユニットセルの製作および能力評価	41
4.1 温度傾斜法による熱伝導率測定	41
4.2 レーザー焼結式金属付加製造による立方体空孔ユニットセル試験片の製作.....	41
4.3 立方体空孔ユニットセルの熱伝導率測定結果	43
4.4 異方性空孔を持つユニットセルの熱伝導率測定結果	50
4.5 結言	54
第5章 ラティス密度分布最適化による金属構造体の表面温度制御.....	56
5.1 定式化.....	56
5.1.1 状態方程式.....	56
5.1.2 ラティス体積分布率分布の最適化問題.....	57
5.1.3 感度解析	58
5.2 数値例.....	59
5.2.1 面内温度分布の最大化	60
5.2.2 面内温度分布の均一化	63
5.3 3D モデルを用いた最適化計算の妥当性確認.....	65
5.4 結言	69
第6章 金属付加製造による最適構造の製作性確認と能力評価.....	70
6.1 レーザー焼結式の金属付加製造装置による最適構造設計品の造形.....	70
6.2 CT スキャンを用いた造形体の評価	72
6.3 実証実験での温度測定方法	75
6.4 温度分布測定結果と考察.....	76
6.5 結言	77
7章 結論.....	79
謝辞.....	83
参考文献.....	84

関連論文.....	89
-----------	----

第 1 章 緒論

1.1 研究背景

近年、付加製造（Additive Manufacturing，以下 AM）技術¹⁾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となり、実用部材への適用例が増えつつある。付加製造では 3D のモデルデータをもとに断面形状のスライスデータを作成し、そのデータを元に材料を積層し 3 次元の形状を得ることが出来る。この特徴により、付加製造は内部の空孔を含むような複雑構造の形成を得意としており、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いる。その為、設計方法についても抜本的な見直しが進んでおり、数値計算を活用し、優れた最適構造を導出する構造最適化の導入や、付加製造向けの設計技術である Design for Additive Manufacturing（以下 DfAM）の研究開発が進んでいる。この付加製造の強みを引き出す設計技術の進展もあり、従来の付加製造は試作品用途が多かったものの、治工具や金型や最終部材など実用部材の割合が拡大してきている（図 1.1）。

本章では、先ず付加製造の工業分野への適用に主眼を置きつつ、各付加製造製法の分類や特徴、構造最適化技術の分類について述べる。その上で、これらの技術を用いて実用部材を製作する上で重要な Design for additive manufacturing について説明し、本研究の対象として工業分野における高温生産プロセスに着目した背景を述べ、目的を示す。

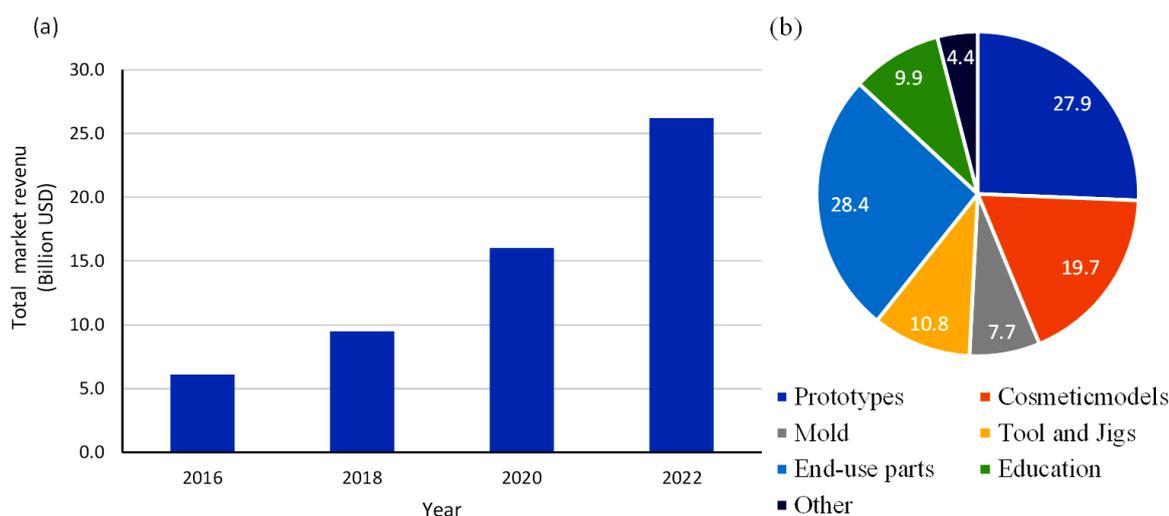


図 1.1(a)付加製造世界市場全体の売上推移²⁾ (b)付加製造技術の使用用途割合³⁾

1.1.1 工業分野における付加製造技術の活用動向

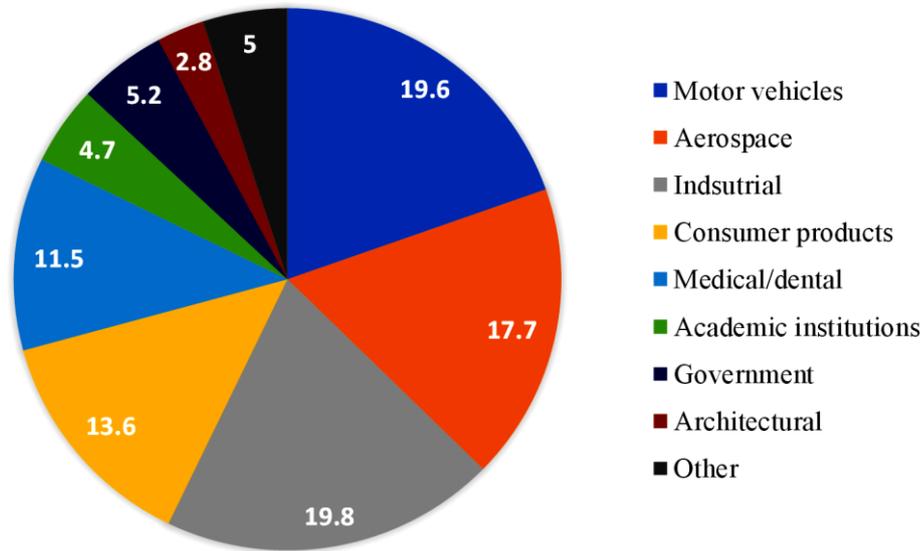


図 1.2 付加製造技術の産業別利用割合⁴⁾

付加製造は材料をボトムアップで積層し 3D 形状を得る為、加工が難しい形状や、細かなカスタマイゼーションが要求される分野への適用が進んでいる。図 1.2 に世界の付加製造技術の使用割合のうち上位の項目を示すが、航空機や医療などの部材単価が高く上述の特徴に適合するセグメントでの使用割合が高い一方、装置や治工具など工業機器・装置産業向けの用途が最多の 19.8%であることが確認できる⁴⁾。工業分野において付加製造の適応性が高い用途について以下に示す。

1. 治工具などの小ロット品

工業機器や治工具は、コンシューマー製品などに対し必要数が少ないため、手作業や切削加工等により少量のみを製作するケースが多く、設計やコストについても制約が伴ってきた。一方で付加製造は金型等を必要とせず構造体の製作が可能な為、図 1.3 に示す通り、一定の生産量までは既存製法に対してコスト面が優れるという利点がある。この利点を活かして治工具系の製作に付加製造を用いる事例が報告されている。Volkswagen では生産ラインの樹脂製治具作成に 3D プリンタを導入し、治具にかかるコストを 90%程度削減するとともに納期短縮も果たしている⁵⁾。また日産自動車でも同様の活用事例が報告されており⁶⁾、実ラインでの活用が旺盛に進んでいる。

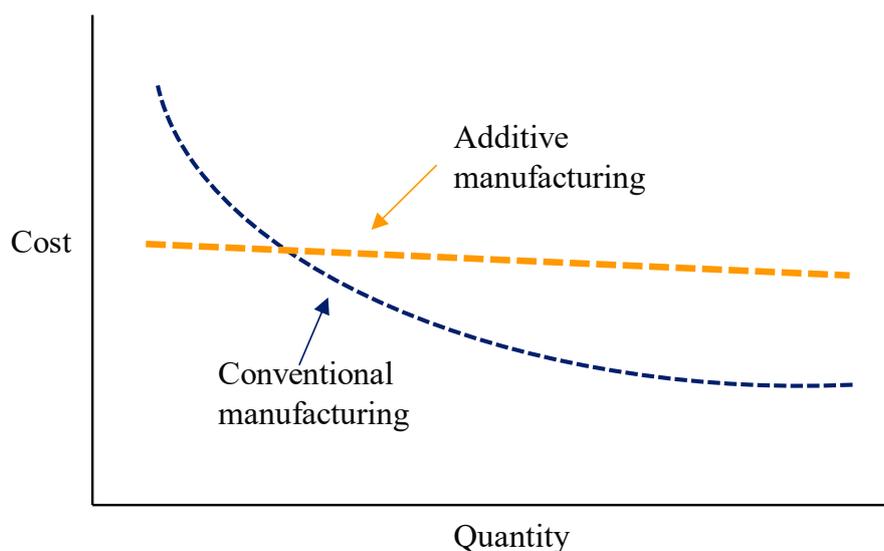


図 1.3 付加製造と既存製法における，生産数量とコストの概念図

2. スペアパーツ調達

販売製品のスペアパーツ供給は生産メーカーにとって，必要量が少量かつ注文時期が不規則な場合が多く，在庫確保や旧型の金型の継続保有などの観点で負担が大きい。これらの課題に対し，スペアパーツ調達対応にも付加製造が活用され始めている。付加製造は 3D モデルデータがあれば必要なタイミングで少量～中量を生産できる利点があり，例えば DAIMLER がバス用のスペアパーツ生産へ導入するとともに⁷⁾，SOLIZE と日本 HP および日産自動車が生産終了になった部品のオンデマンド製造を開始するなど⁸⁾，実用化が進んでいる。

3. 加工数や組み立て数の多い複雑形状品の製作

内部に空孔を含むような複雑構造や加工数の多い部材についても付加製造の展開が進んでいる。従来の切削加工等では複雑形状になると加工数が増えるとともに，複数の部材から組み立てる必要があり，製造コストは増加方向であった。一方で付加製造では複雑形状をボトムアップで積層するため，上述のような部材も追加加工を抑制して製作することが可能である。この利点を活かし，例えば GE では従来 20 個の部材から構成されてきたエンジンパーツを 1 つの部材に設計変更し付加製造で製作することで，製造コストの削減に成功してい

る⁹⁾。この複数部材の一体設計については **part consolidation** と呼ばれ、アカデミアによる研究も活発に進められている¹⁰⁾¹¹⁾。

上記の利点を活かし、少量且つ複雑形状の多い工業分野で付加製造の採用は着実に広まりつつある。一方で、付加製造で実用部材を作成する際には、用途毎に適切な方式を選定することや、高機能な複雑形状部材を設計するにあたり最適化設計の活用が重要となる。加えて、工業分野での活用においては、製作物の精度やコストと工数の兼ね合いの精査も必要である。

これらの付加製造技術の新規獲得や作り込みに向け、各メーカーとも活動を活発化させており、国外では、BMW が **Additive Manufacturing Campus** を開設し付加製造技術の実用化を加速させるとともに¹²⁾、材料メーカーの **BASF** 社は付加製造受託企業の買収による付加製造プロセス技術獲得を進めている¹³⁾。また国内でも、**AGC** がオープンイノベーションの推進を目的とした新研究開発棟の付加製造技術のエリアを構えて用途開拓を加速させるなど¹⁴⁾、多くの取り組みが進んでいる¹⁵⁾。

一般的に上記のようなメーカー内で構築された技術知見、ノウハウは企業の競争力維持の観点で秘匿される傾向が強い。一方で、工業分野において付加製造技術のさらなる用途拡大においては、上記の技術課題やその解決方法を体系化して纏めて公表・活用するなどして、外部企業の技術導入を促すことも重要と考えられる。例えば先述の **GE** や **BASF** などでは、自社の付加製造技術を用いたコンサルティングやソリューション事業を始動させるなど、付加製造技術の設計および製造技術の作り込みは競争力が高い技術であることが窺い知れる。

1.1.2 AM 技術の分類

次に付加製造の歴史と各種方式について述べるとともに、工業用途で特に需要の多い、金属付加製造に着目し各方式の特徴を説明する。

付加製造の起源については、1970年代末-1980年代初頭に、当時名古屋市工業研究所の小玉秀男氏による液槽光融合の原理発明とされている¹⁶⁾¹⁷⁾。その後、本方式の装置については1986年に **3Dsystems** 社を設立および翌年に販売された。また、1989年には **S.Scott Crump** 氏が材料押出法の1つである溶融物堆積法 (**Fused Deposition Modeling: FDM**)を開発および特許化

し Strasys 社を立ち上げるなど¹⁸⁾, 以降各社が複数の付加製造方式を発明および事業化してきた。

付加製造技術の国際規格は 2009 年アメリカの国際標準策定団体 the American Society for Testing and Materials(以下, ASTM)が Additive Manufacturing を用語定義し, 委員会 F42 を立ち上げたのが最初とされている¹⁹⁾。その後, International Organization for Standardization (以下, ISO)も 2011 年に ISO/TC 261 Additive Manufacturing を発足させた後, ISO と ASTM 合同で, ISO.ASTM FDIS 52900 を発行している。日本でもこの規格を基に日本産業規格 JIS が B9441:2020 を発行されており, 付加製造プロセスのカテゴリについては表 1.1 の 7 つに分類されている²⁰⁾²¹⁾。

表 1.1 付加製造技術の分類(ASTM F2792 および JIS B9441:2020)²⁰⁾²¹⁾

ASTM F2792での呼称	JIS B9441:2020		
	番号	用語	定義
Binder Jetting	3.2.1	結合剤噴射, バインダジェット,BJT	液状の結合剤を選択的に供給して, 粉体材料を結合する付加製造プロセス
Directed Energy Deposition	3.2.2	指向性エネルギー体積,DED	集束させた熱エネルギーを利用して 材料を熔融し, 結合し, 堆積させる 付加製造プロセス
Material Extrusion	3.2.3	材料押出 MEX	ノズル又はオリフィスから材料を押し 出し, 選択的に供給する付加製造プロセス
Material Jetting	3.2.4	材料噴出,マテリアル ジェット,MJT	造形材料の液滴を選択的に堆積する 付加製造プロセス
Powder Bed Fusion	3.2.5	粉末床熔融結合,パウ ダーベットフュージョ ン,PBF	熱エネルギーを使用して粉末床を選 択的に熔融凝固する付加製造プロ セス
Sheet Lamination	3.2.6	シート積層,SHL	シート状の材料を積層し, 層間を結 合して造形物を形成する付加製造 プロセス
VAT Photopolymerization	3.2.7	液槽光重合,VPP	容器内の液体光硬化性樹脂を光重 合によって選択的に固化する付加製 造プロセス

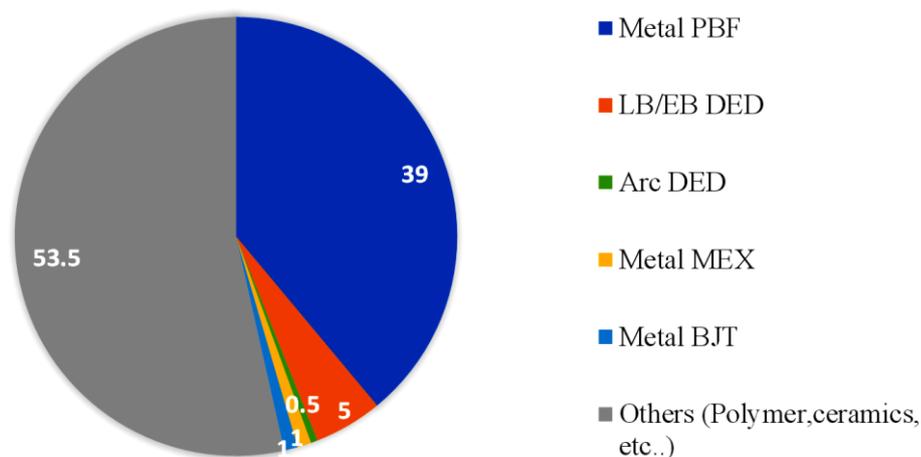


図 1.4 造形方式毎の装置売上の割合

一方で、表 1.1 に示す 7 つの造形方式の中でも活用状況には差が生じている。図 1.4 に 2020 年度の全世界の付加製造装置の売上に占める各造形方式の割合について示す²²⁾。この中でも工業分野における実用部材への技術展開を想定し、金属材料について着目して纏めると、金属材料が付加製造全体に占める割合は全体の 46.5%だが、その大部分が所謂 PBF 方式(熱源:レーザー、電子線)である事がわかる。次いで DED 方式(熱源:レーザー、電子線)、MEX、BJT 方式が続いている。これらの主要方式について、プロセスの概念図と活用事例を以下に説明する。

(1) 粉末床溶融結合 Powder Bed fusion

熱エネルギーを使用し、粉末床を選択的に溶融凝固する付加製造プロセスである。図 1.5 に装置構成を示す。図左側の供給エリア内に粉体材料が貯えられており、粉末床への材料供給時には、エリア内のピストンが供給分の厚み分上昇し、その後ローラーやスキージ等により粉体が運搬される。その後、レーザーや電子線などの熱源が選択的に粉末床へ照射され、表面の粒子を選択的に溶融および凝固させる工程を繰り返す。造形体が得られる。金属の付加製造の中では、表面の性状が比較的滑らかで且つ造形の解像度が高いため、実用部材の製作等に広く活用が進んでいる。また、粉末床内に可能な限り造形体を敷き詰めて配置することで、1 回の造形あたりの製作数を増やす事が可能である。この為、適切な製作対象においては付加製造の中

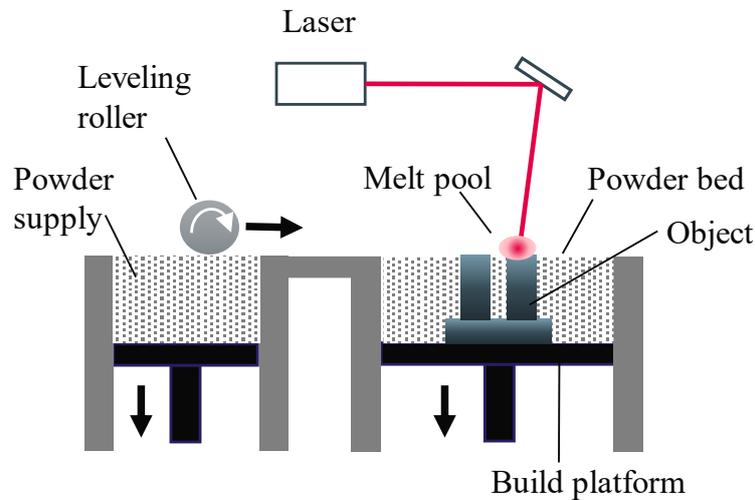


図 1.5 粉末床溶融結合

では高い生産性での部材製造が可能であり、例えば、BMW により実用部材へのマスコダクションにも使用されている²³⁾。一方で、粉体を敷き詰める工程や、1 熱源あたりの照射可能範囲の兼ね合いもあり、造形エリアは商用ベースでは 1 辺 300mm~600mm 程度の機器がまだ大半を占めており、大型の工業部材への適用においては依然課題である。

(2) 指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition)

集束させた熱エネルギーを利用して材料を溶融し凝固させ、堆積させる付加製造プロセスである。図 1.6 に装置構成を示す。粉体材料はキャリアガスによって加工点に供給され、熱源であるレーザーや電子線、プラズマ等も同様に加工点へ照射される。加工点では粉体材料およびステージや既に積層された造形体が溶融し、メルトプールがつくられ、それが凝固することで、造形プロセスが進む。本方式は既存の機械加工機と組み合わせる事で大型化が比較的容易であり、近年では 2000mm の大型付加製造機も三菱重工工作機械より発表されている²⁴⁾。一方で、造形速度次第ではあるが通常のオペレーション条件では、造形の解像度や表面性状は先述の PBF より粗いとされるため、機械加工が前提となることや、内部構造の製作性には制限が生じる場合も多い。このため、目的に応じて PBF と適切に使い分ける必要性がある。

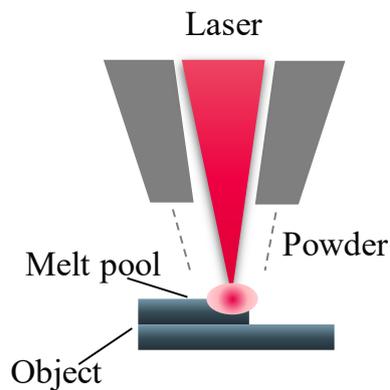


図 1.6 指向性エネルギー体積

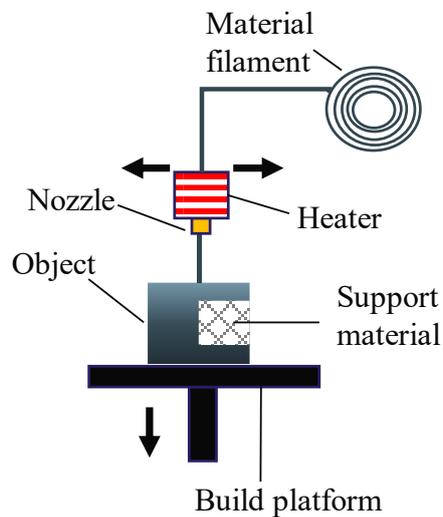


図 1.7 材料押出

(3)材料押出 (Material Extrusion)

ノズル又はオリフィスから材料押し出し，選択的に供給する付加製造プロセスである．通例的に熔融物堆積法 (Fused Deposition Modeling: FDM¹⁶⁾¹⁸⁾と呼ばれることもある．図 1.7 に装置構成を示す．熱可塑性の材料フィラメントが加熱されたノズル介して，造形プラットフォームへ一筆書きのように供給および冷却されることで造形プロセスが進む．金属への適用にあたっては，ノズルを介しての熱の授受のみだと金属を熔融させることが難しい．そのため，材料を熱可塑性樹脂と金属粉からなる混錬物とし，先ずは本方式で熱可塑性樹脂を熔融および成形させグリーン体の造形体を得て，その後電気炉等でデバインダーおよび焼結させ金属構造体を得るプロセスが適用されつつある²⁵⁾．同様の既存方式としては金属粉末射出成型法(Metal

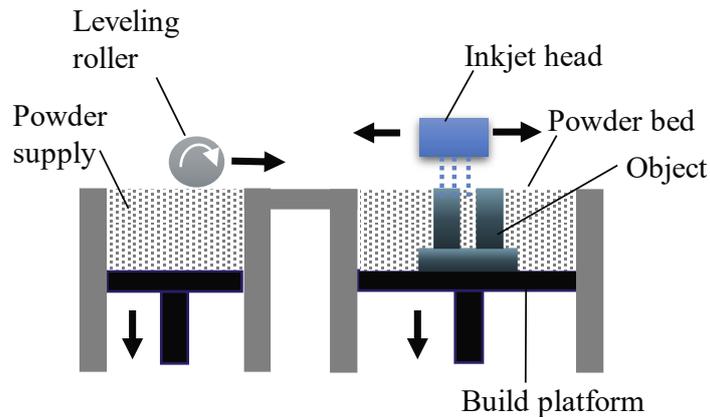


図 1.8 結合剤噴射

Injection Molding: MIM)があげられる。PBF や DED と比較し、高価な熱源を使用する必要がないため、装置価格を抑えられるメリットがあり、試作用途等で活用が始まっている。一方で、焼結時に 20%程度外形が縮むなどの特徴もあり、外形の大きさの制限や制御の難しさが課題といえる。

(4)結合剤噴射 (Binder Jetting)

液状の結合剤(バインダ)を粉末床へ選択的に供給して、粉体材料を結合する付加製造プロセスである。粉末材料の供給方式は前述の PBF と同様である。本方式の金属材料への適応にあたっては、バインダでの材料結合のみでは強度が不十分な為、材料押出と同様に電気炉での焼結工程が必要となる。ただし、PBF 同様に製作物の配置を工夫することで、1ロットあたりの製作数増大が可能であり、材料押出より高い生産性での部材製作が可能である²⁶⁾。また、インクジェットヘッドを用いたバインダ塗布により、細かい解像度での造形も可能である。一方で焼結工程を伴うため、大型部材の製作には適さない等の特徴もある。

上記の通り、付加製造の方式毎に造形可能な大きさ、解像度、適正数量、造形時の設計制約、後工程が異なる。工業分野への用途展開においては、これらの特徴を踏まえつつ、実用上必要な精度などの各種要件を満たす方式を選定することが重要である。また、コストの観点においては、バルク状の物体をそのまま造形するのではなく、造形体積を減らしつつ必要な機能を持つ構造を得る為にも最適化設計との組み合わせも重要である。

1.1.3 構造最適化技術の分類と開発動向-

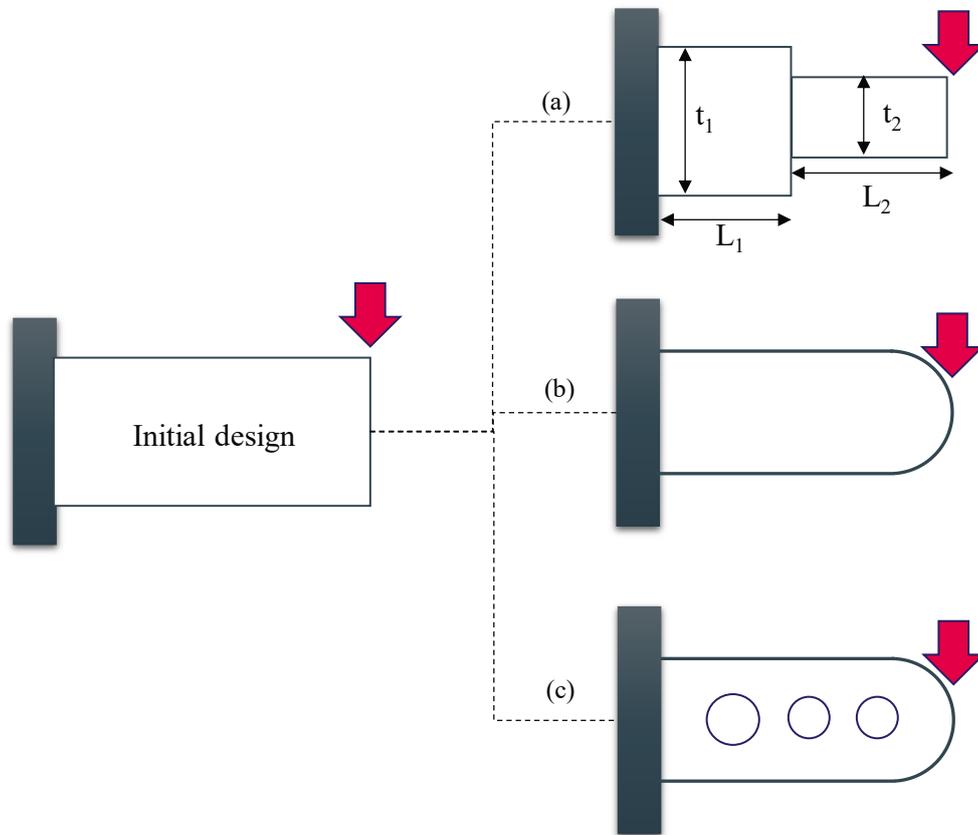


図 1.9 構造最適化の主要方式 (a)寸法最適化 (b)形状最適化 (c)トポロジー最適化

付加製造の強みを引き出す上で最適化計算との組み合わせが重要だと前章で述べたが、構造最適化の手法方式は対象とする設計変数により、図 1.9 に示す 3 つに大きく分けられる。

寸法最適化は、梁の長さや板厚等の構造的な寸法を設計変数とする最適化法である。幾何形状の大きな変更なく最適化を行うため、設計変数が少なく大きな性能向上見込めないものの、汎用最適化ソルバでも多く取り扱われており、設計の下流含め広く活用されている。

形状最適化は、構造体の境界を設計変数として取り扱う最適化法である。構造の外形が最適化される為、形状の大きな変化が可能である。一方で構造体の内部に空孔を設けるなどの形状変化を生じさせることはできない。

これに対し、トポロジー最適化²⁷⁾は設計領域内の任意の箇所の材料の有無を最適化する。この過程で内部の形態も設計変数として変更可能なため、高性能な設計解を導出することが可能である。この内部に空孔を持つ形状の作成は、従来の加工法では工数の大幅な増大に繋

がり困難であったものの、材料をボトムアップで積層し造形体を得る付加製造の実用化に伴い、軽量化²⁸⁾や振動抑制²⁹⁾の機能を有した部材への応用が進んでいる。

トポロジー最適化のアルゴリズムについて

次にトポロジー最適化のアルゴリズムについて概説する。トポロジー最適化では、固定設計領域 D 内において最適化問題を材料の有無を判断する材料分布問題と置き換え、特性分布関数を X_{Ω} とし材料分布を次式で表す。

$$X_{\Omega}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in \Omega_d \\ 0 & \text{if } x \in D \setminus \Omega_d \end{cases} \quad (3)$$

この特性関数 X_{Ω} を用いて、固定設計領域 D 内の任意の点 x における材料有無を判断し、最適構造である設計領域 Ω_d を導出することができる。しかし、この特性関数 X_{Ω} は不連続関数である為、これを用いたトポロジー最適化問題は数学的に解を持たない事が知られている。この不連続問題を連続問題に置き換えるための緩和法として均質化法³⁰⁾や SIMP 法³¹⁾が代表例として挙げられる。一方で、設計領域内で材料が不要と判断された領域は空乏部となるが、この空乏部が 3D 構造体の内部に存在する場合や先述の各付加製造方式に不適な形状である場合、造形上何かしらの追加施策や設計データの改善が必要となってしまう³²⁾。工業応用にあたっては、これらを回避する上での設計指針や、これらの工程負荷を抑制可能な手段の検討が必要という。

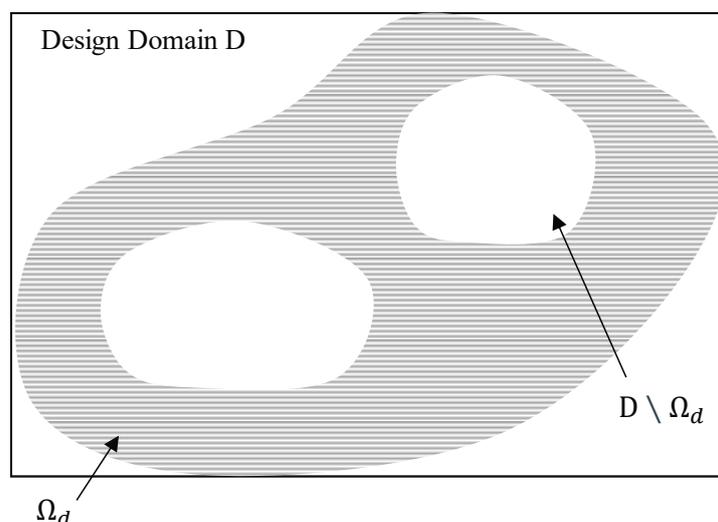


図 1.10 トポロジー最適化と設計領域

1.1.4 Design for Additive Manufacturing について

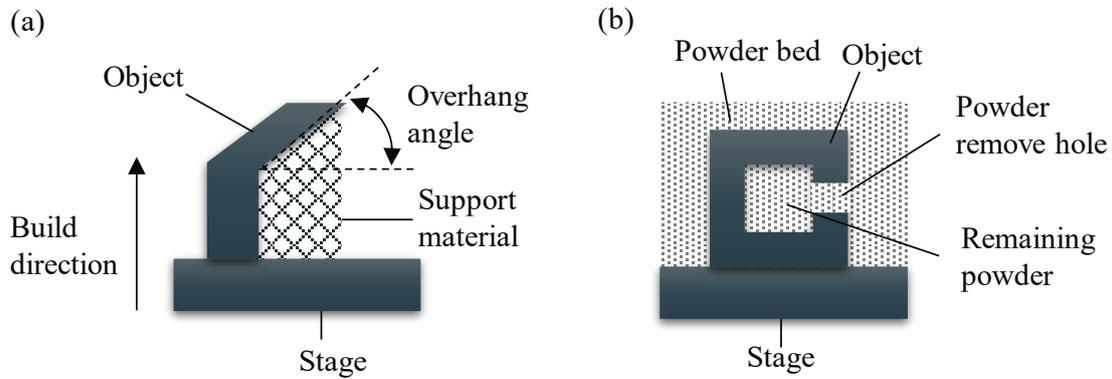


図 1.11 造形則の考慮

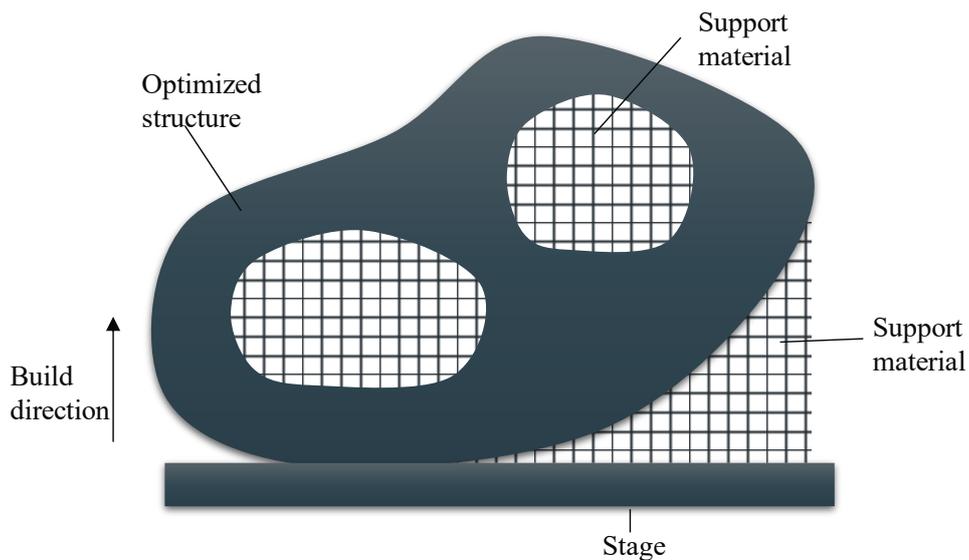


図 1.12 トポロジー最適化構造の付加製造時の課題

前述の通り、付加製造での造形にあたっては方式毎の造形則の考慮や最適化計算の活用が重要であるが、これらの付加製造向けの設計技術は総称で **Design for Additive Manufacturing** と呼ばれている³³⁾。例えば造形則を考慮した設計については、図 1.11 に示す造形方向のオーバーハング角を考慮したサポート材設置の有無や、PBF 方式における構造体内部の粉抜きの考慮等があげられる。また最適化設計においても図 1.10 で示したトポロジー最適化構造を PBF や MEX 方式で造形すると、内部の空孔等にサポート材が必要になってしまう為(図 1.12)、軽量化を果た

しても後加工工数の増大や、あるいは奥行方向に複雑な形状を有しているとサポート材が除去出来ない事態にも繋がり得る。これらに対して、造形則を加味した最適化計算アルゴリズムの研究も進みつつあるが³⁴⁾、現時点では造形前に最適設計解をメッシュベースで補修、もしくは最適解をさらに設計変更する等の対応が必要であり、工程負荷の増大に繋がるとともに、対応出来る人材も限定されており用途拡大の妨げになっている。

上記の設計ノウハウや知見については、アカデミアによる整理³⁵⁾³⁶⁾も進む一方、公的機関による標準化についても ISO/ASTM 52910-18 Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations などの規定策定が近年進められている³⁷⁾。ただ、実運用上は規定や知見が十分でないケースが散見されており、AMSC (America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative)がその需給ギャップと対策の優先度について包括的にロードマップとして纏めている³⁸⁾。その中の設計に関する項目の抜粋を表 1.2 に示す。大きく Design guide, tools, specific application, documentation, verification and validation に区分されており、例えば先述の造形則の考慮や post processing への対応についても整理されている。それらの中で Priority が High に設定されている項目は、

- 1.Design Guides for Specific Applications
- 2.Technical Data Package (TDP) Content
- 3.New Dimensioning and Tolerancing Requirements
- 4.An Organization Schema Requirement and Design Configuration Control

の4つである。2~4については文章の標準化や、付加製造向けのトレランス等の整理であり実用上の必要性が高いのは自明であるが、一方で1の特定用途に対する設計指針についても、付加製造のアプリケーションを拡大する上も重要度は非常に高い。これまで述べてきた通り、付加製造は設計自由度が高い上に、方式毎の造形則や品質の考慮など、多くの制御因子がある。このため使用用途に応じた作り込みが重要なのだが 技術の作り込みが難しい産業分野や試作評価の負荷が重い技術分野にとっては特に注視すべき観点と考えられる。これは、付加製造技術全体の技術発展により、全般的な設計則や post processing の対応などは指針が確立されていく一方で、当該分野においてはその全般的な指針では当該分野特有の技術的課題の解決には不十分な事態が想定される為である。この解決にあたり、当該産業分野に精通した技術者が、DfAM 技術の進展を注視および適宜獲得し当該分野に展開する事が、今後益々重要になっていくと考えられる。

表 1.2 AMSC ロードマップにおける付加製造技術の設計関連課題³⁸⁾

Segment	Title	Priority
Design guide	General Guides for AM	Medium
	Process-Specific Guides for AM	Medium
	Design Guides for Specific Applications	High
	Machine Customizable/ Adaptive Guides for AM	Medium
	Design Guide for Post-processing	Medium
Design tools	A Machine Input and Capability Report	Medium
	AM Simulation Benchmark Model/Part Requirement	Low
	Standardized Design for Additive Manufacturing (DFAM) Process Chain	Medium
Design for specific application	Design for As-built Assembly	Low
	Design for Printed Electronics	Medium
	Design for Medical	Medium
Design Documentation	Technical Data Package (TDP) Content	High
	New Dimensioning and Tolerancing Requirements	High
	An Organization Schema Requirement and Design Configuration Control	High
	A Neutral Build File Format	Low
	New Terminology in Design Documentation	Medium
	In-Process Monitoring	Medium
	Documentation of New Functional Features and Surface Features	Low
	An Acquisition Specification	Medium
Design Verification and Validation	Design for Measurement of AM Features/Verifying the Designs of Features such as Lattices, etc.	Medium

1.1.5 付加製造技術の高温生産プロセスへの展開

これまで述べた通り、工業分野への付加製造技術の適用は進んでいるものの、各造形方式や最適化設計の強みを活用した DfAM 技術の構築は依然需給 Gap がある上に、各アプリケーションでの技術の作り込みが重要な状況である。この為、今後の付加製造の用途拡大を見据えると、工業分野の中でも技術の作り込みの難易度が高く、且つ波及効果の高い分野における DfAM 構築が競争力を有する技術構築に繋がり得ると考えられる。そこで本研究では日本の生産技術の中でも競争力が高いといわれる金型などの高温環境かつ技術の作り込みが難しい分野での付加製造技術活用に着目する。

金型を例に取り組み方向性を統計情報等から考察する。図 1.13 に 2019 年の金型生産額における世界のシェアを示すが³⁹⁾、日本は中国、アメリカに次いで 3 位と高いシェアを誇る。また以下に続く韓国、ドイツも工業国であり当該技術で技術的な競争力を維持する事は、今後日本がものづくりで世界と戦い続ける上でも重要度が高い事が伺える。また、図 1.14 には機械統計(従業員 30 人以上)での金型生産実績の推移を示すが⁴⁰⁾、2011 年と 2019 年を比較すると生産数量自身は約 30%減少しているものの、生産金額は約 26%増加しており、高単価化が進んでいる事も確認出来る。この方向性は、付加製造による少量の難形状造形や高付加価値化とも適合性が高いと考えられる。

また機械統計に基づく 2018 年の国内の金型用途割合は、プレス用金型 39.0%、プラスチック用金型 32.6%、ダイカスト用金型 13.4%、鍛造用金型 8.5%となっている。この際、金型の温度は、プラスチック用型では成形対象にもよるがスーパーエンジニアプラスチックの PEEK などでは 150°C~200 程と高温帯となる上⁴¹⁾、ダイカスト用途では 400°C以上での使用が想定される⁴²⁾。一方で、これらの金型での成形品質の向上を目標に、温度分布や圧力分布をオペレーションの最適化で解決する手段については多くの検討が進められてきたが⁴³⁾⁴⁴⁾⁴⁵⁾、1.1.1 項で述べた付加製造技術の工業分野の展開や、上述の金型の高付加価値化のトレンドを踏まえると、金型自体の構造を改良し温度や機械特性の制御性を高める技術は今後さらに重要度が増すと考えられる。

一方で、上記金型は使用温度環境が高温で過酷である点も踏まえると、付加製造や最適構造を用いる際の実環境でロバスト性やトレランスの評価およびその改善活動は、常温のアプリケーションよりも難易度が高いと想定される。また、成形バリエーションの多さや外形上の複雑

性を考えると、設計工程の負荷を抑えつつ高機能な最適構造を得る事が出来る、設計手法の開発も重要と考えられる。加えて、高温で使用する金型向けのこれらの付加製造技術は、同様に高温で材料を成形する窯業、鉄鋼業、ガラス製造など全般への展開も期待でき、工業分野全般への波及効果も期待できる。

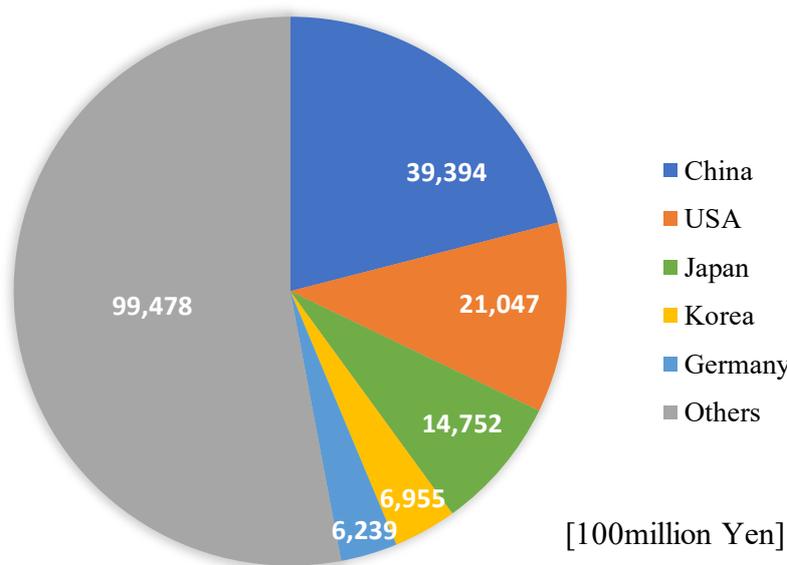


図 1.13 2019 年の全世界の金型生産高³⁹⁾

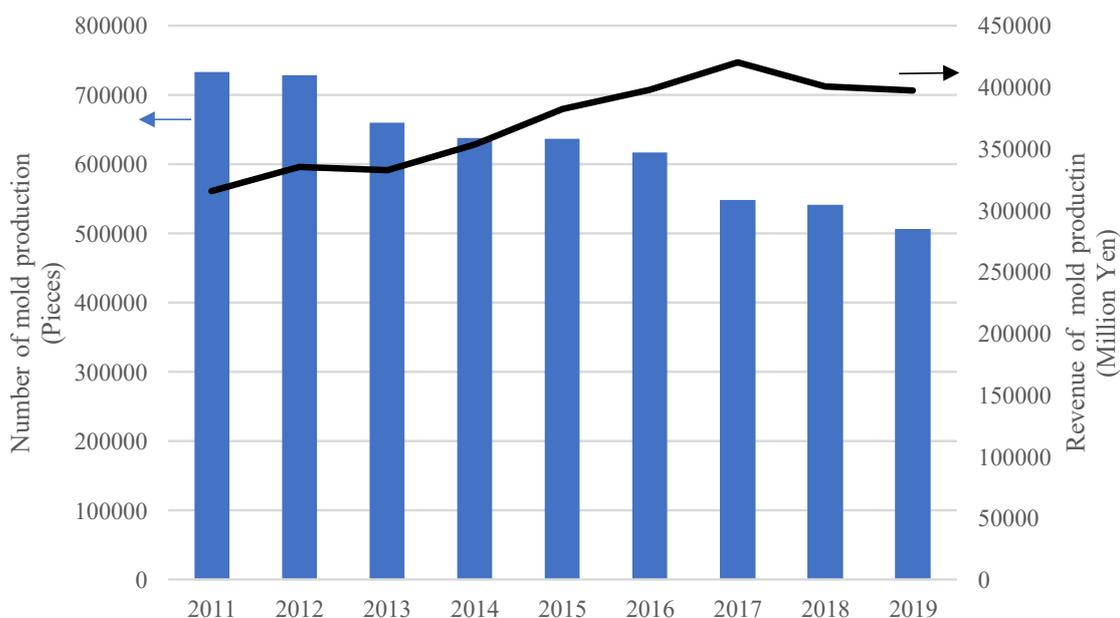


図 1.14 2011 年から 2019 年の日本国内における金型生産量および金型生産高⁴⁹⁾

1.1.6 ラティス体積分率分布最適化

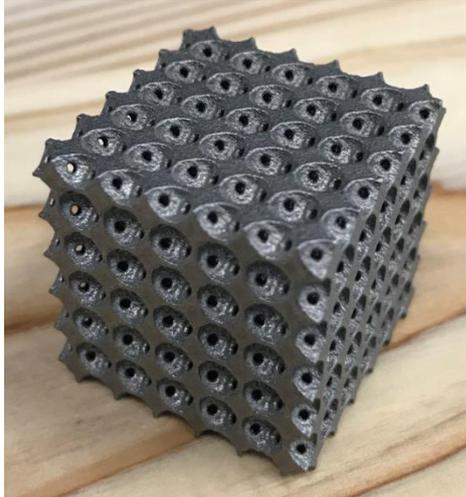


図 1.15 ラティス構造の例

これまで述べた課題を踏まえると、設計負荷や付加製造の造形則の制約を抑えつつも高機能な解を導出できる最適化手法を確立し、高温環境での用途へと展開した上で実用上の性能や精度を評価することは、工業分野における付加製造技術の用途拡大に大きく寄与できると考えられる。本研究では、上記内容に適した最適化計算方法としてラティス体積分率最適化⁴⁶⁾を提案する。ラティス構造は付加製造に適した構造であり、外形を従来通りに保ちつつも、内部の剛性などの機械的特性を制御する事が可能である⁴⁷⁾。この構造を用いた最適化手法がラティス体積分率分布最適化であり、単一のラティス構造を構造体の最小単位であるユニットセルとして取り扱い、構造体内部でその配置を目的関数に応じ最適配置する。つまり、対象構造の最適化問題をラティス構造体の体積分率分布問題に置き換え、機能性を有する構造の導出を行う。これまで軽量化時の剛性最大化⁴⁶⁾や振動特性の改善⁴⁷⁾等への適用が報告されている。

この方式では構造の最小単位であるユニットセルを積層造形装置での製作性が担保された形状に設計出来れば、そのユニットセルから構成される最適構造も製作性を損なわず設計可能だと考えられる。またトポロジー最適化と同様のアルゴリズムを用いた高性能な設計解の導出も可能なため、最適解の修正工程の削減と高機能な最適解の両立が期待できる。これらのユーザービリティと最適構造の両立は、前述の通り設計や評価が難しく、使用環境が

厳しい高温生産プロセス向けの機器や金型へ付加製造技術を適用する上で有用と考えられる。

1.2 本研究の目的

近年、付加製造技術の実用部材への適用が加速しており、その中でも、工業分野については構造最適化と組み合わせる事で、既存部材や設備の高機能化や軽量化を達成できる利点が注目され、さらなる用途展開が期待されている。

一方で、構造最適化により設計された高性能かつ複雑な形状を付加製造で製作する際には、製法に起因する形状の制約を考慮した設計変更が必要になる為、設計工程の負荷が大きくなる点が課題の1つである。これらの課題について、2018年米国AMSCで標準化動向を網羅的に纏めており、基本的な設計則などの整備は勿論だが、アプリケーション毎の作り込みや設計指針の確立について優先度が高いと提言している。

上記を踏まえ、工業分野の中でも日本が得意とする金型や工業分野へ付加製造技術の適用拡大を考えると、高温分野における性能評価や、最適構造による熱関係の機械特性の制御、一点ものや外形状の複雑さに対応した、設計負荷の少ない最適計算手法の確立が重要だと考えられる。

そこで、本研究では工業分野で需要の多い高温環境の生産プロセスへ、構造最適化と付加製造技術を組み合わせた高機能な部材を展開するべく、高性能な最適解の導出と付加製造での製作性を両立した部材設計を可能とする構造最適化手法の開発を目的とする。また本研究においては、机上での最適解の導出だけでなく、製作性や実際に製作された部材の設計解との性能差など、技術の社会実装において重要と考えられる課題の解決にも着目し検討を進める。上記の取り組みを通じ、高温生産プロセス向けの Design for Additive Manufacturing 技術の確立を目指す。

1.3 本論文の構成

以下第2章では、今回の検討対象である、高温生産プロセスにおける金型や生産設備の高機能化の開発動向と課題について纏め、この課題解決方法としてラティス体積分率最適化を提案し、同手法を用いた最適化のワークフローと、研究対象とした課題について説明する。

第3章では代表体積要素法(RVE法)を用いた、熱伝導率制御ラティスユニットセルの設計方

法について述べる。また、数値例として、内部空孔の基準寸法を設計変数として実効熱伝導率を算出し、実効熱伝導率の制御範囲を確認するとともに、設計変数に対する実効熱伝導率の近似式を算出する。加えて、内部空孔の基準形状の差異や、主要な金属付加製造方式である PBF 法で本構造を製造する際に必要な粉抜き穴が実効熱伝導率に及ぼす影響についても解析により評価する。

第 4 章では、3 章で設計したラティスユニットセルについて、その実造形品の性能確認を目的として、レーザー焼結式の金属付加製造装置でユニットセルから構成される試験片を作成し、温度傾斜法を用いて熱伝導率を測定する。この際、3 章で設計した空孔形状や外形が異なる試験片についても作成および性能評価し、体積分率だけでなく空孔形状が実効熱伝導率に及ぼす影響と解析結果との差異について明らかにする。

第 5 章では、3 章および 4 章で設計したユニットセルを用いて、ラティス体積分率最適化により構造体の温度分布制御設計手法を開発し、その内容を説明する。次に数値例として任意表面の温度分布について、最大化および均一化制御する最適構造を導出する。また最適構造を付加製造用に 3D フルモデル化した上で同等の境界条件で熱伝導解析を行い、3D モデル化工程の妥当性についても確認する。

第 6 章では 5 章で設計した最適構造をレーザー焼結式の金属付加製造装置で造形し、CT キャンで造形体の製作性や寸法精度を評価する。また温度分布制御能力の実証試験として最適構造とリファレンスの温度分布を比較し改善効果を評価する。

第2章 高温プロセス向けの構造最適化と付加製造技術

本章では、本研究で着目する高温生産プロセス分野における構造最適化技術の開発動向について述べる。次に本研究で取り扱うラティス密度分布最適化について詳細を説明するとともに、高温プロセス向けに当該技術を適用する上での実状・課題についても述べる。

2.1 高温生産プロセスにおける構造最適化設計の取り組み

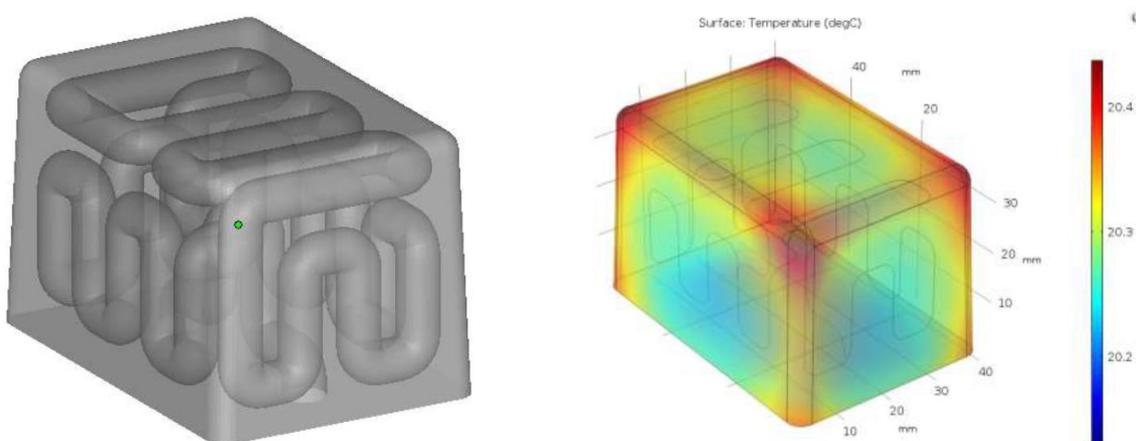


図 Conformal Cooling channel の設計検討例

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⁴⁸⁾、蒸気加熱を用いた手法⁴⁹⁾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、付加製造技術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。

金型への付加製造技術の活用例としては内部の複雑構造の形成を得意とすることから、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⁵⁰⁾。このうち、内部の冷却構造を自由度高く配置する設計は Conformal Cooling Channel と呼ばれ、国内外で報告例が増えてきている⁵¹⁾⁵²⁾。このような金型の利点としては、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げられる。

一方で前章でも述べた通り、付加製造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、その構造設計についても、抜本的な見直しが進んでいる。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進められている。その中でもトポロジー最適化²⁷⁾は熱伝達率最大化問題⁵³⁾に関する検討例がこれまでもあり、近年は付加製造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も確認されている⁵⁴⁾。しかし前章で述べた通り、トポロジー最適化により導出された最適構造を付加製造装置で造形する際には、付加製造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り、用途拡大に向けた課題である。

2.2 ラティス体積分率分布最適化の熱関係への展開

上述の課題解決に向けラティス体積分率分布最適化の熱関係への適用を本研究では検討する。本手法では気孔形状を工夫することにより、軽量高剛性⁵⁵⁾や軽量高熱伝導率⁵⁶⁾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²⁸⁾。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る。

図 2.2 にラティス密度最適化のワークフローを示す。まずはユニットセルの実効物性値について、ユニットセル内の寸法代表値を設計変数として、代表体積要素法(Representative volume element: RVE 法)を用いて導出する⁵⁷⁾。その近似式を設計領域 Ω における状態方程式に代入して解いた後、目標関数および制約条件を計算する。目標関数が収束していない場合は、随伴方程式を解くことで目標関数と制約条件の感度を計算し、逐次凸関数近似法の一つである MMA 法 (Method of Moving Asymptotes)⁵⁸⁾ を用いて、設計変数を更新する。

ここでユニットセルの設計で用いる RVE 法について図 2.3 に示す。この手法ではマイクロレベルで不均質な複合材料から成る構造体の特性を表現するにあたり、微小領域の特性を評価した上で、構造体がこの微小領域から構成されると捉え全体の特性を算出する。この際、この代表的な微小領域を代表体積要素(RVE)、あるいはユニットセルと呼ぶ⁵⁹⁾。この手法は機械力学的特性値以外にも熱伝導率等を対象にすることも可能であるとともに、固体材料と空気や冷媒との組み合わせにも拡張可能なため、温度制御を伴う構造体のラティスユニットセルの設計にも適用可能であると考えられる。

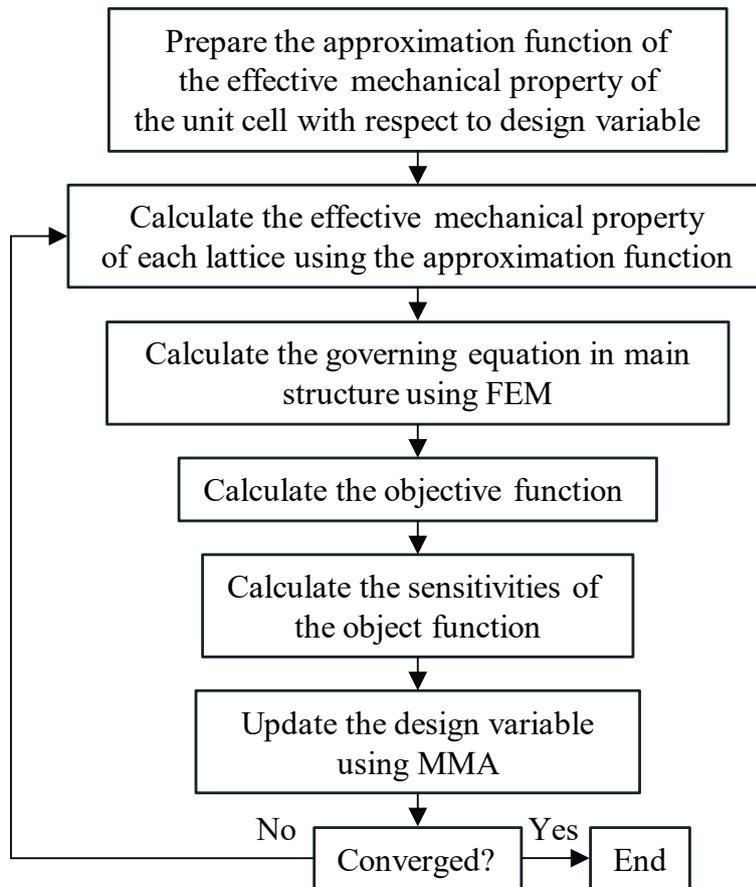


図 2.2 ラティス密度分布最適化のワークフロー

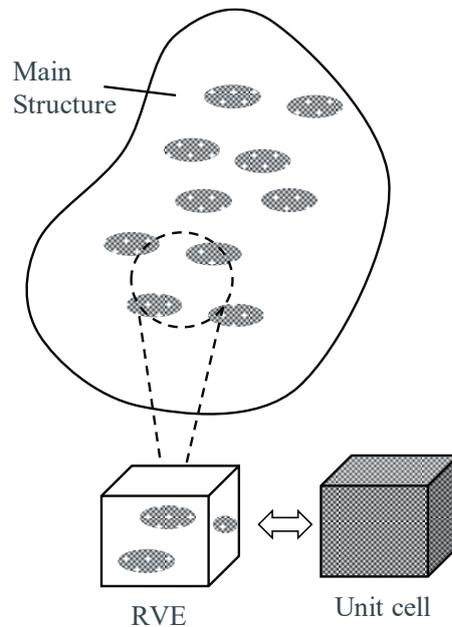


図 2.3 RVE およびユニットセルの概念

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³⁰⁾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⁶⁰⁾。

従来工法や先行事例を踏まえ、本方式を熱関係の工業分野に適用するにあたり、有用と考えられるアプリケーションを下記に 2 つ提案する。

1.内部温調媒体の流路設計への活用

1 つは先程の Conformal Cooling Channel と同様に内部冷却流路への展開である。これは冷却水流路を固体材料と冷媒から構成されるユニットセルに置き換え、最適配置させるものである。Conformal Cooling Channel の設計においては、付加製造の制約を加味した最適解の設計変更の必要性があるが、ラティス体積分率分布最適化を用いる事で、この設計変更を大きく抑制できる可能性がある。この技術にはついては 2019 年に竹澤らが解析での実証を報告するとともに⁶⁰⁾⁶¹⁾、2020 年に実験での能力評価を報告している⁶²⁾。

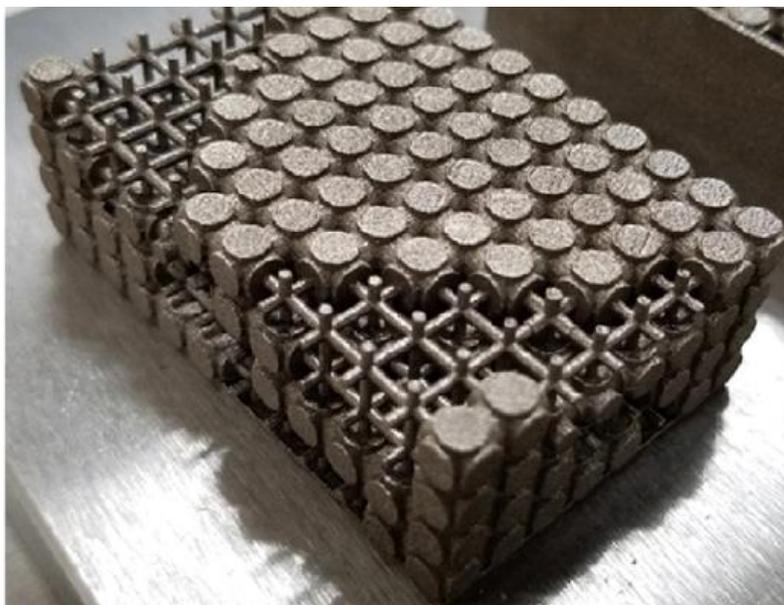


図 2.4 ラティス体積分率分布最適化を用いた冷却回路の最適構造例

2.熱伝導率分布制御への活用

もう1つが、熱伝導率を制御可能なユニットセルを設計した上で、構造体の熱伝導率分布をユニットセルの配置によって最適化し、特定箇所の温度分布制御へ活用する方法である。従来もトポロジー最適化により熱伝導率を制御しようとする試みはあったが、ラティス体積分率分布最適化で達成できれば、設計工数を抑えた実用性がより高い手法が確立できるとともに、前述の高機能冷却化などの温調機能の高性能化開発との相乗効果も期待できる。

一方で工業分野での実用にあたっては、試作用途以上に設計解と実部材の性能差の明確化や、大型化への対応なども重要であるため、以下に主要な検討項目を列挙する。

a)ユニットセルの各種設計要素が、実効熱伝導率へ及ぼす影響

構造材料と空気から構成されるユニットセルを想定した際、その設計の自由度の高さを考慮した以下の検討項目があげられる。

- ・空孔部の形状が実効熱伝導率の制御性に及ぼす影響
- ・セルのスケールが実効熱伝導率に及ぼす影響
- ・内部形状の等方性・異方性による実効熱伝導率の制御性の差異

図 2.6 に示す通り、同一の体積分率のユニットセルでも複数の空孔形状を取りうる為、製作性も増えつつ上記を踏まえた設計指針の確立が重要だと考えられる。

b)付加製造での製作誤差が、ユニットセルの実効熱伝導率に及ぼす影響

設計時点での誤差に加え、付加製造での製作に伴い生じる実効熱伝導率への影響も想定される。1章で述べた通り、方式による製作誤差に加え、粉抜き穴やサポート材の影響、空孔形状による製作性の差異による影響を確認し、誤差の程度を明確にする必要がある。

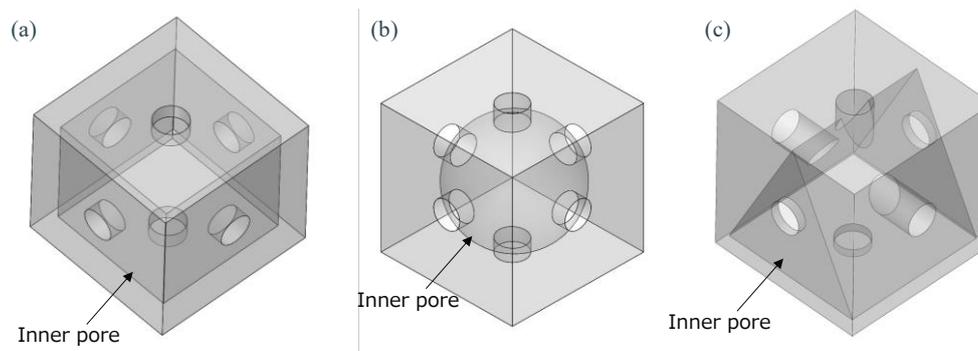


図 2.6 ユニットセルの空孔形状の例 (a)立方体空孔 (b)球状空孔 (c)三角柱空孔

c)温度分布制御向けのラティス体積分率分布最適化計算技術の開発

ラティス体積分率分布最適化の温度分布制御については、温度均一化や任意の点の温度差制御への展開例はまだ無く新規の開発が必要である。また、先述のユニットセルの設計変数に対する実効熱伝導率の近似式を用いて算出した最適構造に対し、実際に付加製造造形する詳細な 3D モデルでの解析した際に精度が担保できるかについても確認が必要である。

d)ラティス体積分率分布最適構造体の製作性および能力評価

ラティス体積分率分布の熱伝導率分布最適化ワークフローについては、図 2.2 の内容を、ユニットセル部分の実効物性値を実効熱伝導率に、構造体全体の計算については温度分布を対象にする等の変更が必要である(図 2.5)。導出された最適構造についても、ユニットセルと同様に製作性に伴う誤差が想定される為、その確認と、実際の温度分布制御能力の精度についての確認が必要である。この際、工業応用を考える上では一定以上の大きさで造形した上で、大型化に向けた課題の抽出も必要と考えられる。

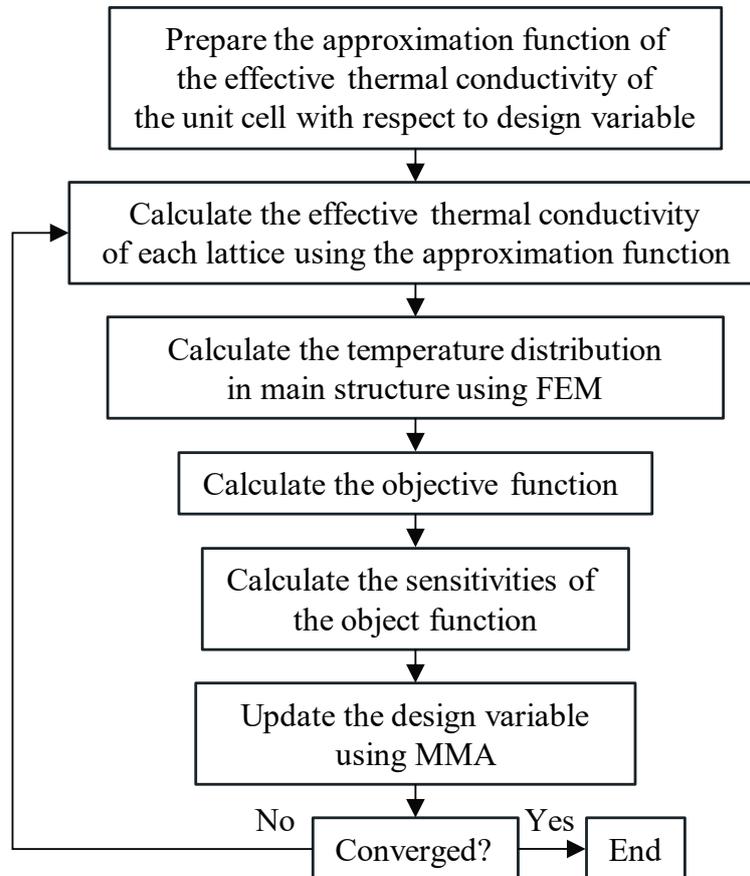


図 2.5 温度分布最適化問題についてのラティス体積分率分布最適化フロー

熱伝導率制御に関するラティス体積分率分布最適解について温度分布問題へ展開するとともに、上述の a)~d)のマイクロからマクロに渡る課題を一貫して検討し纏めた事例はなく、これらを明確にする事は、工業分野特に高温プロセスの分野における付加製造技術の用途拡大に大きく寄与できると考えられる。上記を踏まえ、以下 3 章から 6 章では上述の a)~d)について詳細検討を進める。

2.3 結言

本章では高温生産プロセスにおける金型等の生産設備の高機能化設計の動向および付加製造技術適用に向けた展望と課題を先ず述べた。次に、解決策としてラティス体積分率分布最適化の適用可能性について述べるとともに、実用に向けた課題をあげ本研究の目的を示した。以下にその要約を記す。

1. 高温生産プロセス向けの高機能化設計は従来から多くのエンジニアリング的な改善施策が検討されてきた。一方で近年は付加製造技術の実用化に伴い、内部の複雑構造の形成を得意とすることから、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。
2. 付加製造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、その構造設計についても革新進んでおり、トポロジー最適化を始めとした構造最適化法の導入事例が多く報告されている。
3. 一方で最適構造を付加製造で造形するには、付加製造装置の造形則を加味した構造設計が必要であり、この課題の解決と高性能な最適構造の両立を目指し、本研究ではラティス体積分率分布最適化を当該分野へ適用する事を提案した。
4. ラティス体積分率分布最適化は均質化法により材料部材と空孔や冷媒から構成されるユニットセルを設計した後、構造体内部のユニットセルの配置を目標関数に従い最適配置する。

5. 本方式を高温生産プロセスに適応するにあたり，ユニットセルから構成される冷却回路を最適配置と活用する案と，ユニットセルにより熱伝導率を最適配置させ，温度分布を制御案の2つを提案．本研究では後者に着目して検討を進める事とした．

6. その上で，マイクロからマクロに渡る本方式の精度などの課題を提案し，各課題を一貫通貫で検討することで，高温プロセスにおけるラティス体積分率分布適用を目指すこととした．

第3章 RVE法を用いた熱伝導率制御ラティスユニットセルの設計手法

本章ではラティス体積分率分布最適化を熱問題へ展開するにあたり、熱伝導率制御が可能なラティスユニットセルの設計を行う。ユニットセルの設計にあたっては代表体積要素法(RVE法)を用いるとともに、ユニットセルのパラメーターのうち、実用上とくに重要と想定されるものについて、実効熱伝導率に及ぼす影響を評価する。具体的には、ユニットセル内の空孔形状、レーザー焼結式の金属付加製造装置での製作にあたり必要な粉抜き穴の寸法、ユニットセルの外径について評価する。最後にユニットセルの設計変数と実効熱伝導率の相関について、近似式を得て、次章以降の構造体の熱伝導率分布最適化に適用させる。

3.1 ラティスユニットセルの基本設計

3.1.1 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 3.1 および図 3.2 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。

$$\begin{aligned} -\nabla \cdot (\lambda \nabla T) &= 0 \text{ in } \Omega \\ T &= T_0 \text{ on } \Gamma_1 \end{aligned} \tag{3.1}$$

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⁶³⁾。

3.1.2 ラティスユニットセルの実効熱伝導率の定式化

この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 (3.2) より、直接計算して求められる⁶⁴⁾⁶⁵⁾。

$$\frac{1}{2} \lambda^* \overline{\nabla T} \cdot \overline{\nabla T} = \frac{1}{2} \int \lambda \nabla T \cdot \nabla T dx \quad (3.2)$$

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 (3.2) 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。

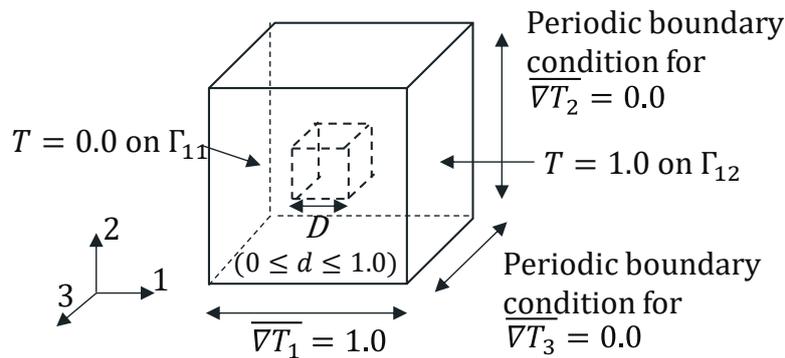


図 3.1 立方体空孔ユニットセルの境界条件

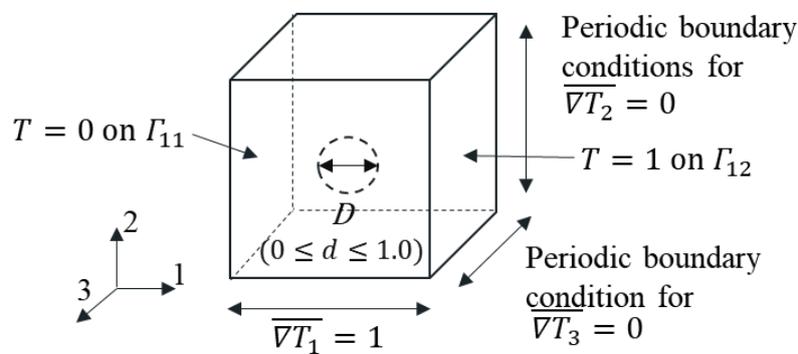


図 3.2 球状空孔ユニットセルの境界条件

この際、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。

また、ユニットセル内の内部空孔の形状については、球状の場合も検討した。その際には立方体空孔の場合と同様の境界条件を与えるとともに、球状の径 D が設計変数 d と対応するように定式化した。

3.1.3 ユニットセルの粉抜き穴の設計

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付加製造装置を用いるが、この方式ではレーザーにより金属粉末を選択的に溶融させて造形するため、内部に空孔を有するラティス構造等を作成する際には、構造体の未溶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、未溶融粉体除去用の粉抜き穴を追加し(図 3.4 参照)、この穴径が実効熱伝導率に及ぼす影響を確認した。

3.1.4 ユニットセルの壁厚の設定

ユニットセルの設計にあたっては、セル内部の空孔の代表長さ D を設計変数 d と対応させる必要があるものの、空孔の大きさの上限については、選定する付加製造方式の造形則を加味して設定する必要がある。特に造形則の中でも、1造形あたりの最小解像度の考慮が必要である。例えば 1.2 節で示した造形方式のうち、DED 方式についてはノズル径にもよるものの約 1mm 程度が 1造形あたりの最小幅となる為、少なくとも 1mm 以上の壁厚が必要となる。一方で、SLM 方式等のレーザー焼結式の付加製造装置では、0.2mm 程度が最小幅となる。

また、付加加工の専業受託メーカーなどに確認すると、製作の確度を高める上では上記の最小改造の2倍程度を最小厚みに設定するケースが多いとのことである。このように、用いる造形方式と製作性の実状を考慮した上で、ユニットセルの各種寸法範囲を定める必要がある。

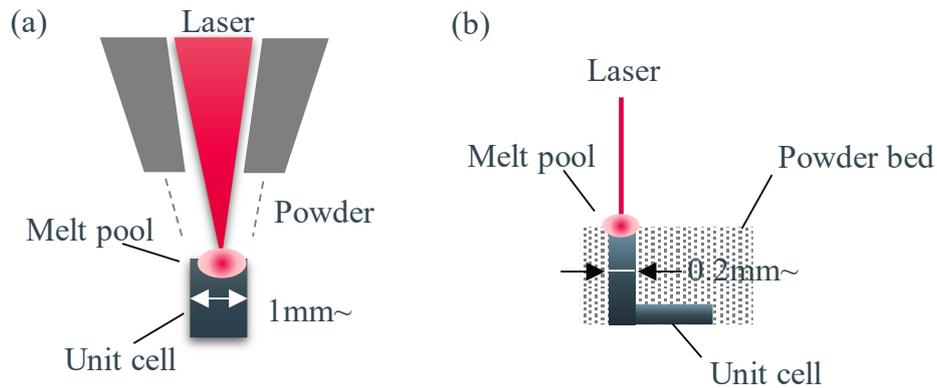


図 3.3 付加製造方式とユニットセルの最小壁厚 (a) DED 方式 (b) SLM 方式

3.2 数値例

3・2 節で定義した設計方法を踏まえて、ユニットセルの実効熱伝導率と各パラメーターとの相関について評価し、本計算方法の妥当性を確認した。

3.2.1 立方体状の内部空孔のユニットセル

まずは図 3.4 に示す立方体の空孔を持つユニットセルの実効熱伝導率について評価した。ユニットセルは 3.2 節で示した構造を元に設計し、セル外形の一边を 5.0 mm とした。内部の立方体空孔の一边の長さ D ($1.0\text{mm} \leq D \leq 4.5\text{mm}$) を設計変数設計変数 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 d 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一边の長さについては、3.2.3 項で述べた通り、レーザー焼結式の金属付加製造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、3.2.2 項で述べた通り、ユニットセルには粉抜き穴を設計した。その際、粉抜き穴径は 1.0 mm および 2.0 mm の 2 ケース用意し、実効熱伝導率の制御範囲を評価した。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 (COMSOLAB 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 3.5 に示す。粉抜き穴径 1.0 mm の場合、設計変数 $d(0 \leq d \leq 1.0)$ 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 2.0 mm の場合は、設計変数 $d(0 \leq d \leq 1.0)$ 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下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。

上記の点を踏まえ、ユニットセルのバルク状態を 1.0 とした時の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 3.6)。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(表 3.1 参照)。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。

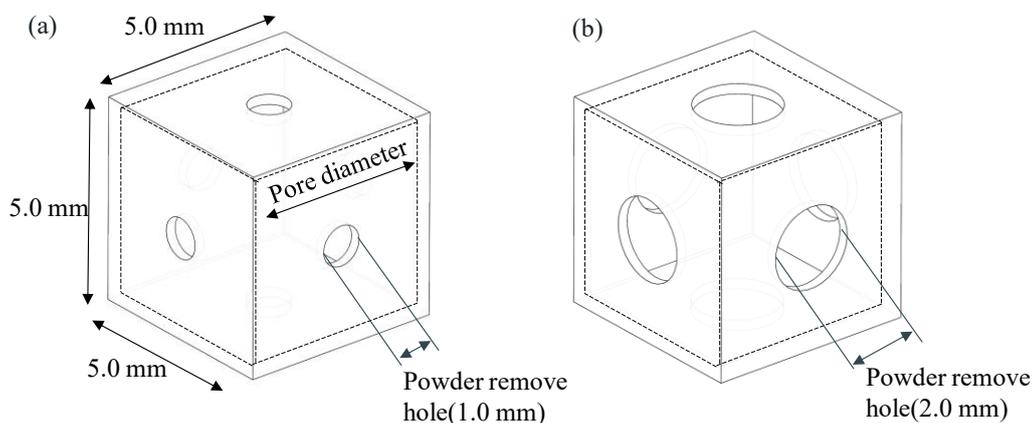


図 3.4 立方体空孔ユニットセル外形. (a) 粉抜き穴径=1.0 mm. (b) 粉抜き穴径=2.0mm.

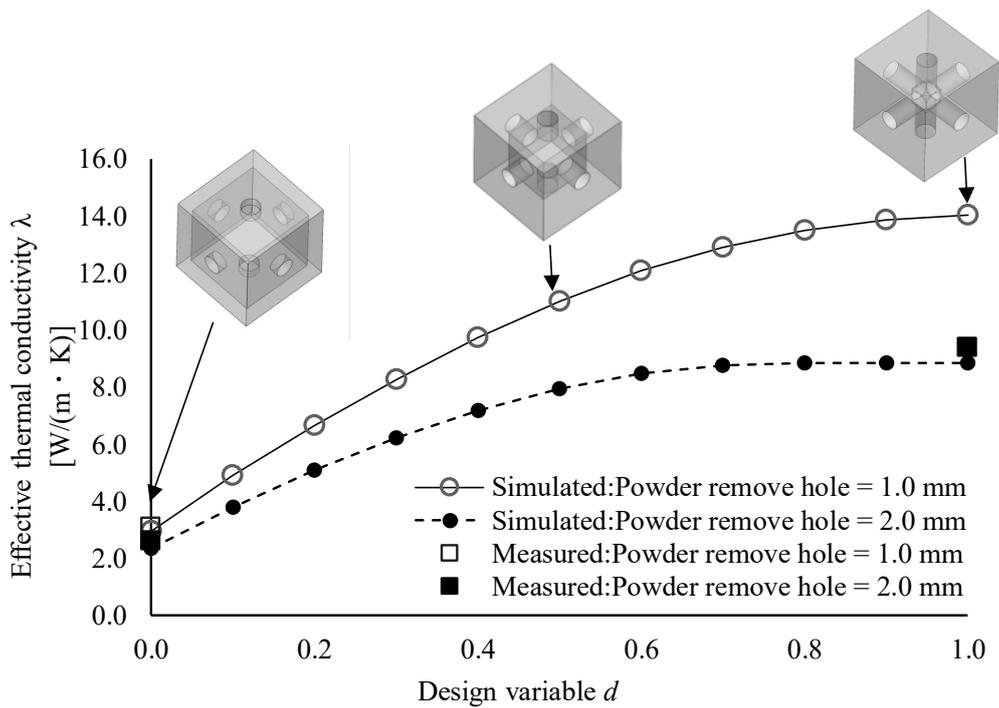


図 3.5 立方体空孔ユニットセルにおける設計変数と実効熱伝導率の相関
 近似曲線-粉抜き穴 1mm: $\lambda = -2.440d^3 - 6.376d^2 + 19.860d + 2.976, R^2 = 1.000$
 近似曲線-粉抜き穴 2.0 mm: $\lambda = -1.040d^3 - 10.097d^2 + 16.404d + 2.300, R^2 = 0.999$

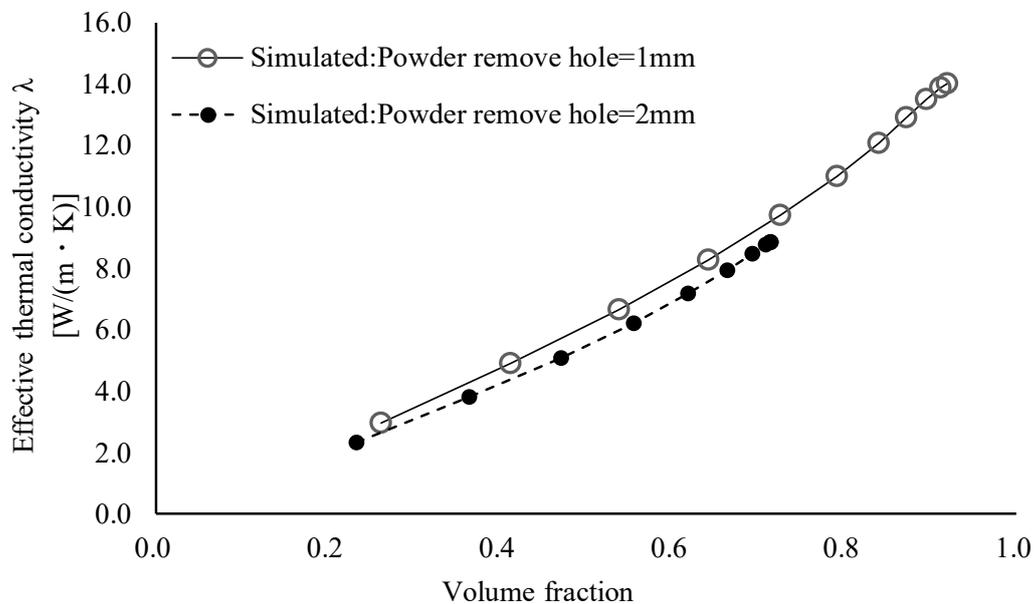
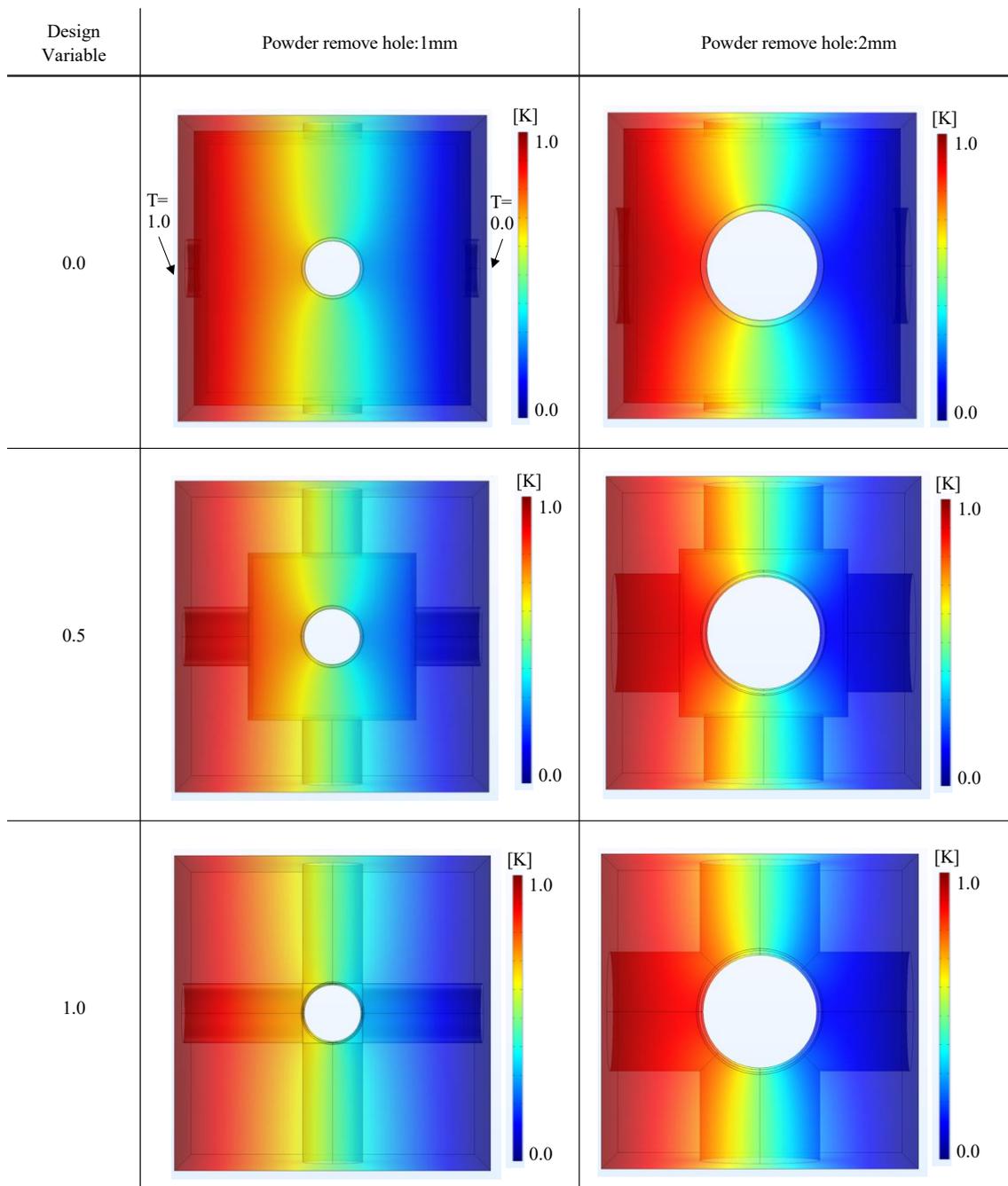


図 3.6 立方体空孔ユニットセルにおける体積分率と実効熱伝導率の相関
 近似曲線-粉抜き穴 1mm: $\lambda = -2.440d^3 - 6.376d^2 + 19.860d + 2.976, R^2 = 1.000$
 近似曲線-粉抜き穴 2.0 mm: $\lambda = -1.040d^3 - 10.097d^2 + 16.404d + 2.300, R^2 = 0.999$

表 3.1 立方体空孔ユニットセルの温度分布断面



3.2.2 球状の内部空孔のユニットセル

次に、図 3.7 に示す球状の空孔を持つユニットセルの実効熱伝導率について評価した。球状の空孔を選定した理由については、2 章で述べたレーザー焼結式の付加製造における高さ方向のオーバーハング問題に対して、立方体空孔よりも球状の空孔の方が、サポート材が必要にな

る可能性が低い点に着目した為である。ユニットセルは 3.2 節で示した構造を元に設計し、セル外形の一辺を 5.0 mm とし、粉抜き穴径は 1.0mm とした。また、内部の球状空孔の直径 D ($1.0 \text{ mm} \leq D \leq 4.5 \text{ mm}$)を設計変数 d ($0 \leq d \leq 1.0$)と対応するように制御し、設計変数 d 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。

図 3.8 に球状空孔ユニットセルにおける設計変数と実効熱伝導率の相関を示す。また、比較用に、粉抜き穴径 1.0 mm の立方体空孔ユニットセルの実効熱伝導率のデータも掲載する。球状空孔では設計変数 d ($0 \leq d \leq 1.0$)の範囲において、実効熱伝導率は $7.8 \leq \lambda \leq 14.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ の範囲で制御出来る事が確認された。球状空孔は立方体空孔に対し、内部空孔部のサポート材等の観点で造形時に有利と考えられる一方で、今回のような代表長さを設計変数と設定する系においては熱伝導率の制御範囲が狭まる。この為、造形の制約と要求される熱伝導率の制御範囲幅を考慮しながら、内部形状を選定することが重要と言える。

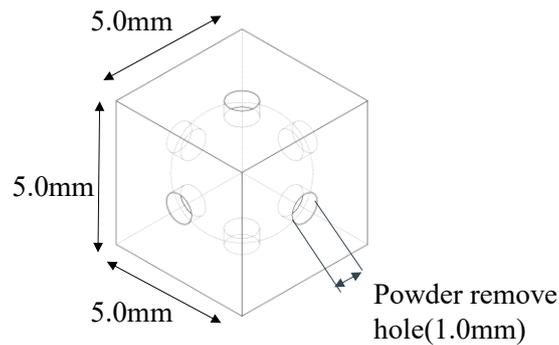


図 3.7 球状空孔ユニットセル外形

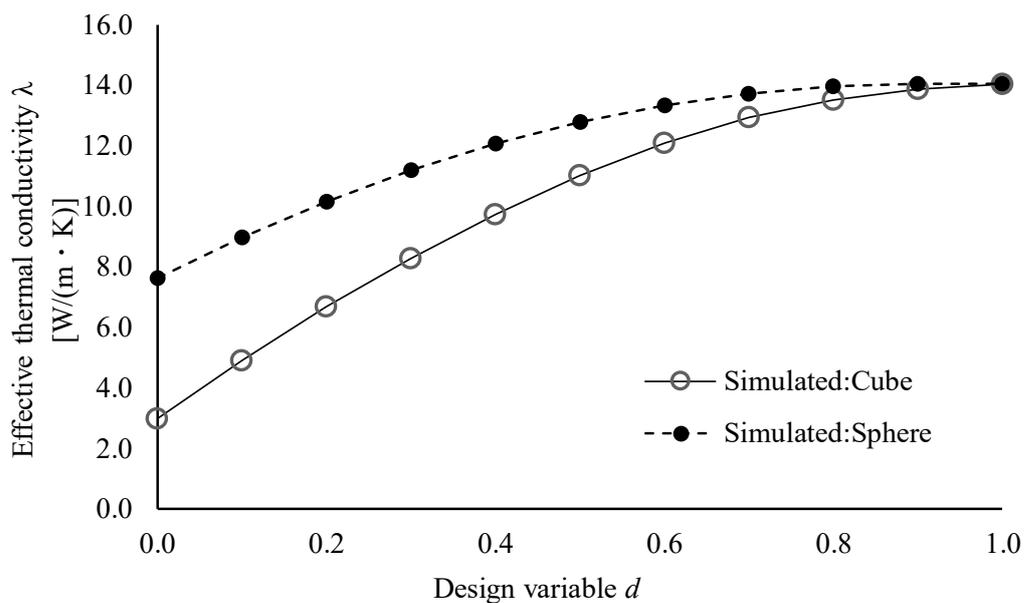


図 3.8 球状空孔ユニットセルと立方体空孔ユニットセルと実効熱伝導率の差異

3.2.3 ユニットセルのスケールアップ

次に、ユニットセルの外形を 5.0mm から 10.0mm にスケールアップしたユニットセルについても、設計変数と実効熱伝導率の相関を確認した。3.2.3 節で述べた通り、付加製造の工法によりユニットセルの最小解像度が異なる。一方で、従来設計からスケールを変えてもそれまでの知見が応用出来るか、相似則が成り立つか否かは、開発負荷などの兼ね合いから工業分野での展開時には考慮すべき項目であり、今回検討対象とした。

セル外形の一辺は 10.0 mm とし、粉抜き穴径は 2.0mm とし、3.3.1 節で検討した 5mm ユニットセルの 2 倍とした。また内部の立方体空孔の制御についても同様に 2 倍となるように制御し、一辺の長さ $D(2.0\text{mm} \leq D \leq 9.0\text{mm})$ を設計変数 $d(0 \leq d \leq 1.0)$ と対応させ、設計変数 d 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。

図 3.10 にスケールアップ前後の各ユニットセルの設計変数と熱伝導率の相関を示す。5.0mm, 10.0mm とともに設計変数に対して同等に追従しており、今回の境界条件および状態方程式においては、寸法比が同等であれば解析上は同等の結果が得られる事が確認できた。

次章にて、実際の造形体を用いて両者の熱伝導率を測定し、この結果についてさらなる考察を進める。

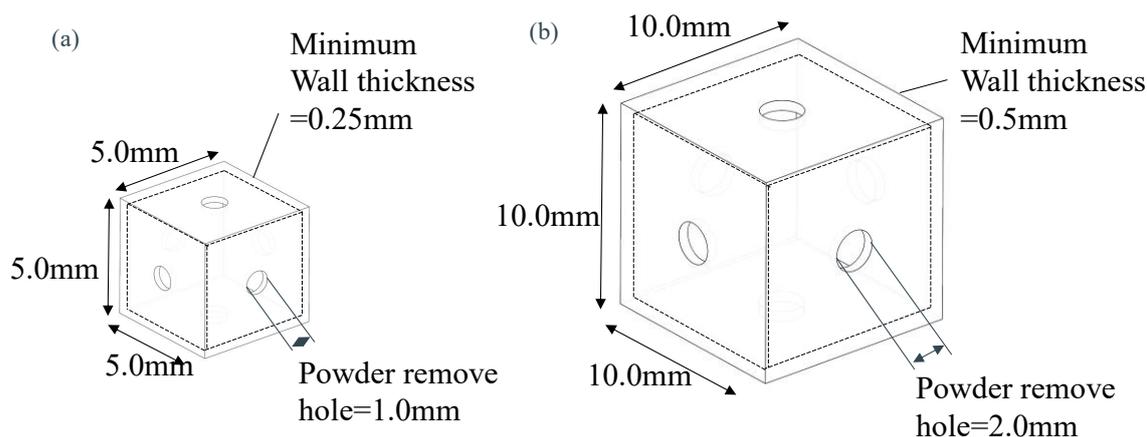


図 3.9 (a)5.0mm 角ユニットセル外形 (b)10.0mm 角ユニットセル外形

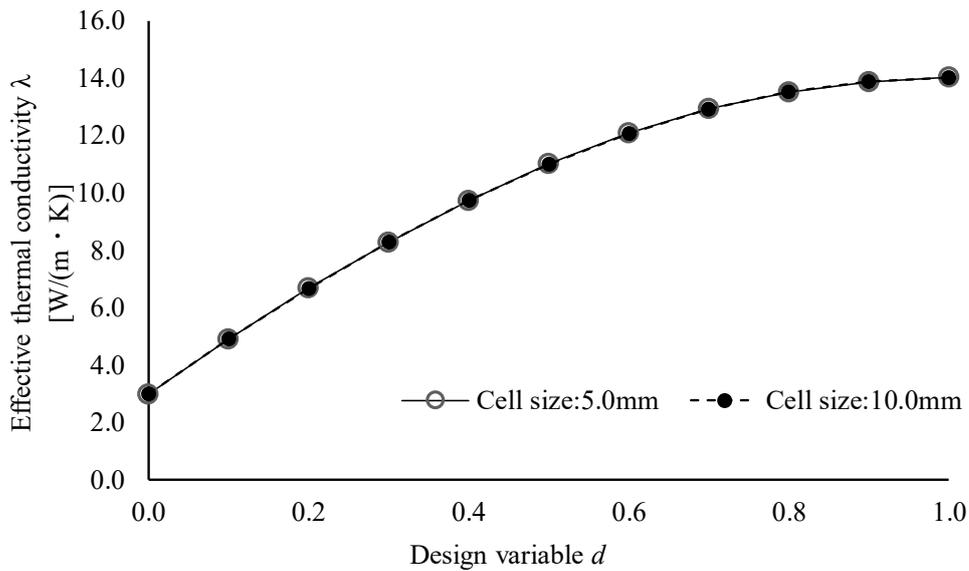


図 3.10 ユニットセル外形毎の設計変数と実効熱伝導率の相関

3.3 異方性ユニットセルの設計

ここまでは等方的な空孔形状を持つユニットセルについて検討を進めてきたが、先述の造形則等を踏まえると、内部空孔形状を異方性とせざるを得ない場合が想定される。例えば DED 方式ではオーバーハング角の許容度が 20° 程度とされている為、造形方向の先端が楕円や鋭利な形状となる必要がある。このような場合、図 3.11 に示すような三角柱上の空孔を持つユニットセルが必要になると想定される。

一方で、図 3.11 のような異方性な空孔形状を持つユニットセルにおいては、実効熱伝導率においても各方向成分により異なる事が想定される上、適切な境界条件の設定についても実物での能力評価と合わせた検証が必要である。

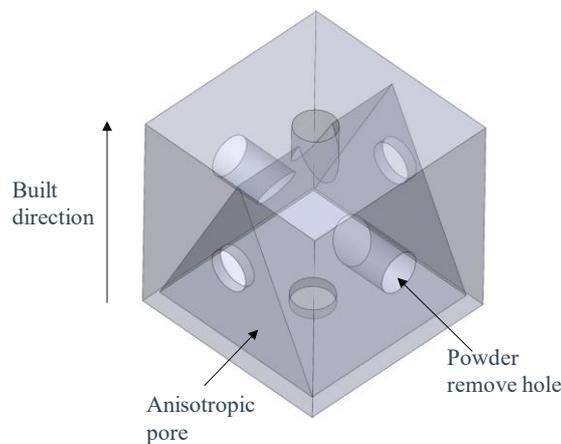


図 3.11 異方性空孔ユニットセル(三角柱空孔)

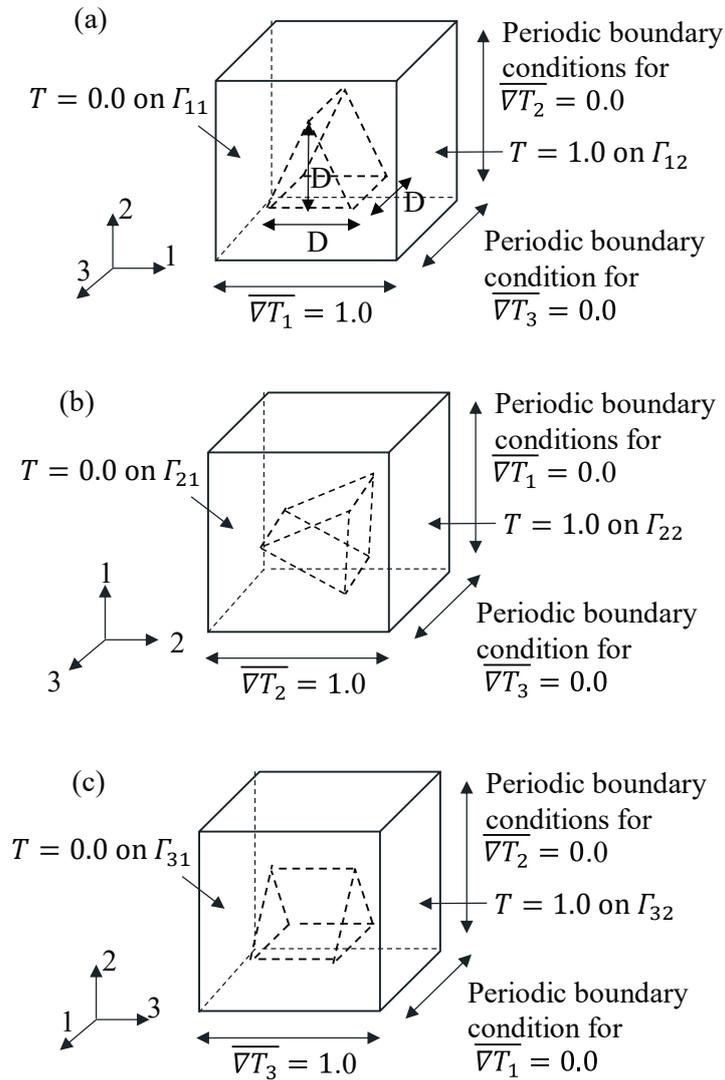


図 3.12 異方性ユニットセルの境界条件 (a) 1 軸方向 (b) 2 軸方向 (c) 3 軸方向

図 3.12 にユニットセルの外形および各境界条件を示す. ユニットセル外形の一辺は 10.0 mm とし, 粉抜き穴径は 2.0mm とした. また図 3.12 で示す通り三角柱の底面の一辺, 高さおよび三角柱の高さ $D(1.0\text{mm} \leq D \leq 9.0\text{mm})$ を設計変数 $d(0 \leq d \leq 1.0)$ と対応させ, 設計変数 d 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. また, 温度境界条件は各 1 軸, 2 軸, 3 軸毎に対面する面に単位温度 1.0K 差を与えた.

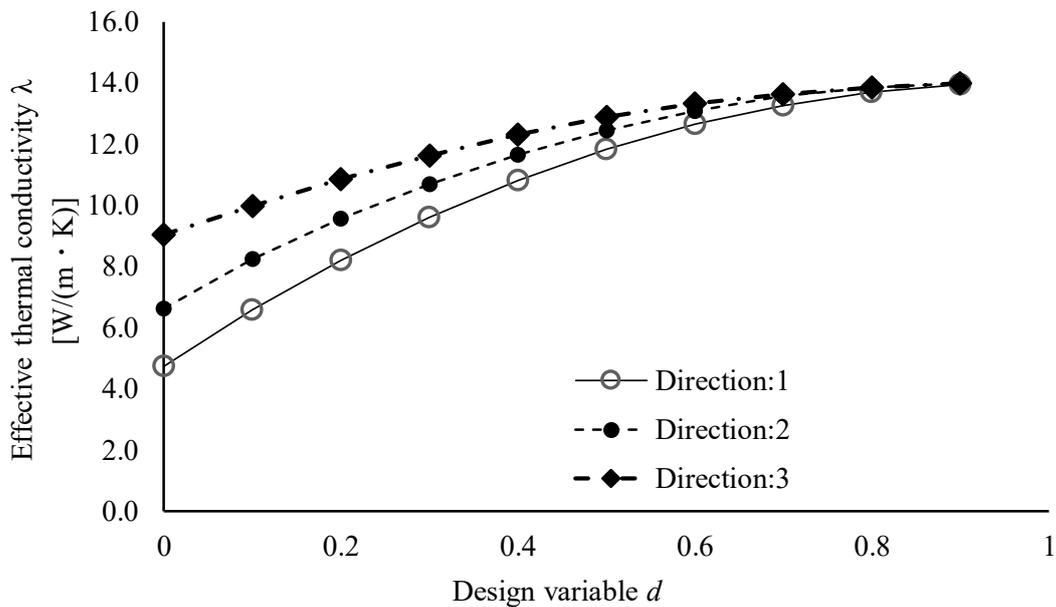


図 3.13 異方性ユニットセルの各軸方向の実効熱伝導率

図 3.13 に軸毎の設計変数と実効熱伝導率の相関について示す。それぞれの軸方向で設計変数に対する体積分率は同一ではあるものの 1 軸方向では $4.7 \leq \lambda \leq 14.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 、2 軸方向は $6.6 \leq \lambda \leq 14.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 、3 軸方向は $9.1 \leq \lambda \leq 14.0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ と制御範囲が異なる結果が得られた。これは対称境界への熱の流入量の差異や各条件における断面積変化の差異に起因すると想定されるが、解析のみで結果の正否を判断することが難しい為、4 章での実測値との対比を踏まえて考察をすすめる。

3.4 結言

本章では均質化法を用いた熱伝導率制御ラティスユニットセルの設計手法について説明するとともに、数値例を用いて手法の妥当性について評価した。以下にその要約を記す。

1. ユニットセル内部の空孔の代表長さを設計変数 $d (0 \leq d \leq 1.0)$ とおき、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より、実効熱伝導率と設計変数との相関について計算した。
2. 先ずは立方体状の内部空孔のユニットセルを用いて、レーザー焼結式の金属付加製造機でのユニットセル造形を想定し、粉抜き用の穴が実効熱伝導率の制御範囲に及ぼす

影響を評価した。その結果、同一の体積分率であっても、粉抜き穴径が異なると断面積が変わり、実効的熱伝導率が数%程度変わる事を確認した。

3. 適用範囲の拡大を見据え、ユニットセルの外形寸法を寸法比は相似のままスケールアップした際の、設計変数と実効熱伝導率の相関について確認し、解析上は両者に差異が無い事を確認した。
4. 内部の空孔形状について、立方体や球などの等方的な形状に加え、異方性形状として三角柱の空孔での各方向成分の実効熱伝導率を算出した。その結果、同一体積分率でも2倍近い差異が解析上では得られた。
5. 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。また解析精度などに関する評価は、4章での実測と対比を進める。

第4章 金属付加製造による熱伝導率制御ラティスユニットセルの製作および能力評価

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付加製造装置を用い、ユニットセルから構成される試験片を付加製造で製作した後、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。試験片は5mm角の立方体空孔に加え、10mm角のスケールアップ品、異方性の三角柱空孔を製作した。また、熱伝導率の測定には温度傾斜法を用いた。

4.1 温度傾斜法による熱伝導率測定

まず、今回用いた温度傾斜法による熱伝導率測定方式について示す。この方式では図4.1(a9)に示す装置を用いて、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、フーリエの法則である以下の式により熱伝導率 λ を算出する⁶⁾⁶⁾。

$$\lambda = Q \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (4.1)$$

ここで、 Q は試料を通過する熱流束(W/m²)、 Δx は試料厚み(mm)、 ΔT は試料上下間の温度差(K)である(図4.1.)

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と判断し採用した。また、試験片の表面粗さの影響を排するため、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。

4.2 レーザー焼結式金属付加製造による立方体空孔ユニットセル試験片の製作

次にレーザー焼結式の金属付加製造装置を用い、立方体空孔ユニットセルから構成される試験片を製作した。試験片は前節で述べた温度傾斜法の測定装置の制約を踏まえ、40mm×40mm×10mmの大きさとした(図4.2)。付加製造装置としてはMatsuura LUMEX Avance-25を使

用し、材料は解析と同様に SUS316-L を用いた。

ユニットセル形状については評価内容を踏まえ、表 4.1 の通り選定した。まず、粉抜き穴径の違いによる解析結果と実能力の評価用に、A・B の 2 試験片の測定結果を比較した。また、設計変数に対する実効熱伝導率の近似式の実能力との対比については、セルの外形と粉抜き穴径が同一で設計変数が異なる B・C の測定結果を比較し評価した。またユニットセルのスケールアップの影響については、A の各寸法を 2 倍に設定した D のサンプルを製作し、評価した。

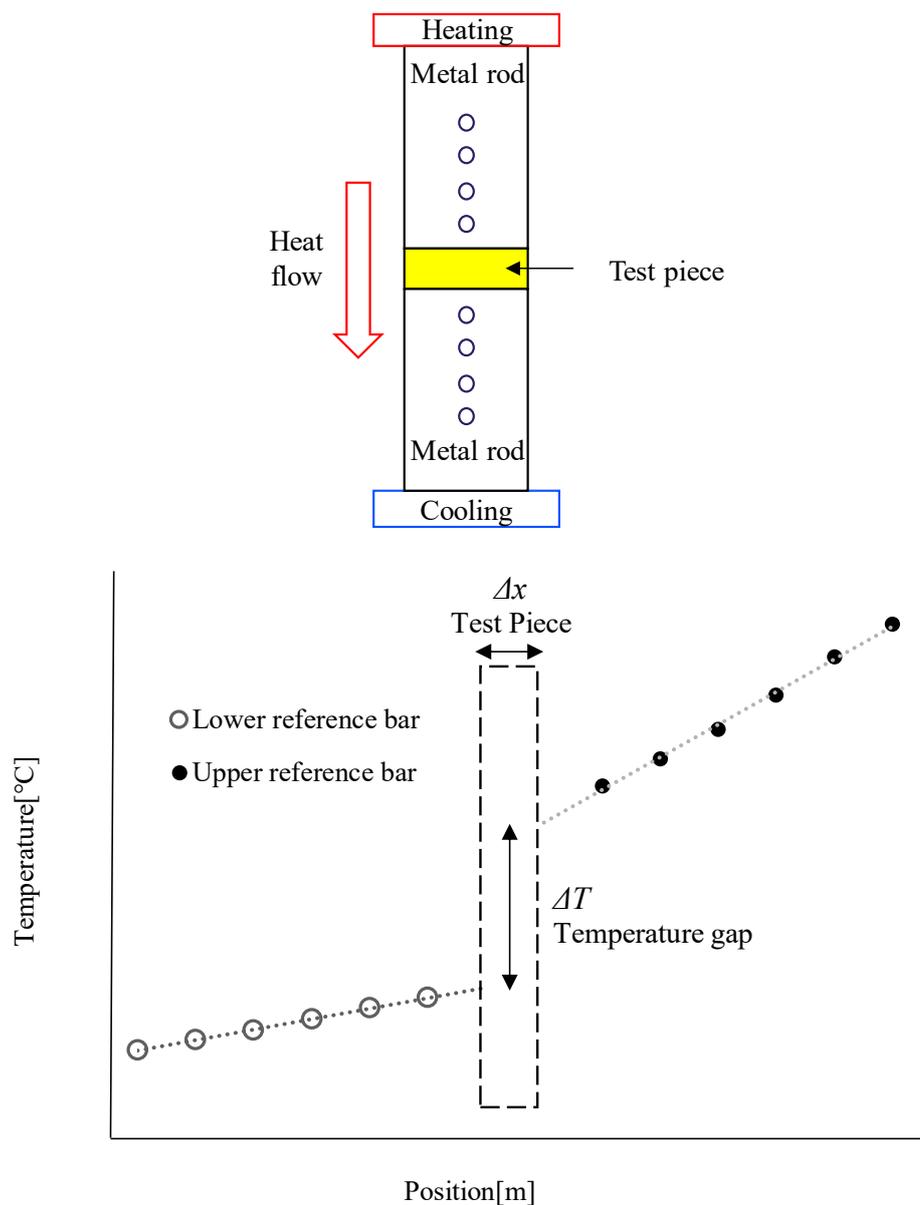


図 4.1(a) 温度傾斜法の測定機器概略図 (b)温度測定結果のプロットイメージ

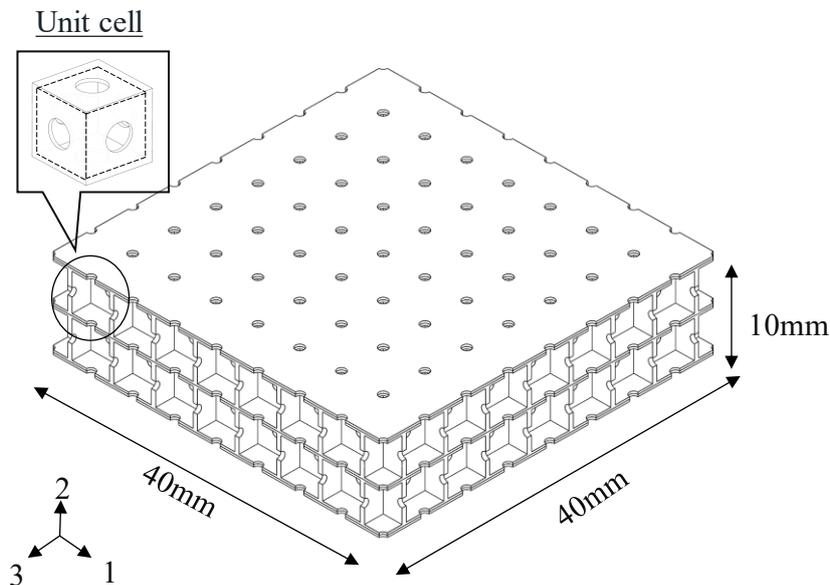


図 4.2 実効熱伝導率測定用試験片

表 4.1 試験片に用いた立方体空孔ユニットセルの種類

Saple No	A	B	C	D
Unit cell size [mm]	5.0	5.0	5.0	10.0
Powder remove hole [mm]	1.0	2.0	2.0	2.0
Simulated weight [g]	39.0	33.0	91.4	33.4

4.3 立方体空孔ユニットセルの熱伝導率測定結果

前節で述べた A から D の 4 つの各試験片の評価結果を、表 4.2 から表 4.5 に示すとともに、解析結果との差異について、粉抜き穴径違いの比較結果を図 4.3 に、ユニットセル外径違いの比較結果を図 4.4 に示す。各表には各試験片の外形写真、粉抜き穴付近の写真、温度傾斜法での測定データ、重量および熱伝導率の設計値と測定値を纏めた。

各表に示す通り、各試験片の外形は大きな形状の崩れなく造形できていた。一方で粉抜き穴形状については粉抜き穴 1.0mm の A のケースで形状の崩れがあり、実測値として穴径が 0.7mm 程度に閉塞している箇所も確認された(表 4.2)。一方で粉抜き穴径 2.0mm の試験片は、閉塞傾向は特に確認されてないため、今回の試験片以上の大型部材を製作する際は、粉抜き穴径は少なくとも 1.0mm よりは大きくすべきと判断した。

次に、造形物の重量について解析結果と比較すると、表 4.2, 4.3, 4.4 に示す通りユニットセル外径 5.0mm の場合には造形体の方が 2.0%~10.0%重い結果が得られた一方で、ユニットセル外径 10.0mm の場合には造形体の方が 4.8%軽かったことが確認された(表 4.5)。この重量差に対しては、試験片に表面に固着している粉体が影響を及ぼしていると考えられる。例えばユニットセル外径 5mm の A と 10mm の D 両者の造形体表面を確認すると、A のユニット断面に残留粉体と思われる凹凸が多数確認される一方で、D では凹凸が少なく表面が滑らかなことが確認できる。

次に、熱伝導率について実測値と解析の実効熱伝導率を比較したところ、ユニットセル外径 5.0mm の場合には造形体の方が解析結果に対し 3.0%~11.1%高くなる結果が得られた一方、ユニットセル外径 10.0mm の場合には造形体の方が 3.0%低くなる結果が得られた。この差異については、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および、上述の重量差の傾向と対応している点を踏まえると、実際の造形体の重量増減が、熱伝導率の実測値増減に寄与したと想定される。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も先行研究で確認されている⁶⁷⁾。このため、各サンプルのミクロな性状に対する分析評価も、今後本手法の精度を高める上では重要だと考えられる。

一方で、図 4.3 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。

また、ユニットセル外径が実効熱伝導率へ及ぼす影響については、3 章での解析上は確認されなかったものの、実測では上記で述べた設計解に対する重量増減と対応して顕在化した。このような製作性の差異に伴う重量差が熱関係の物性値に影響を及ぼす点を考慮すると、実用において精度よく最適構造を出力する際は、ユニットセルの形状時点から、設計制約に加え、それを満たした上でも生じる表面性状等の細かな誤差にも十分に留意した上で選定する必要があると判断した。

表 4.2 試験片 A の各種測定結果

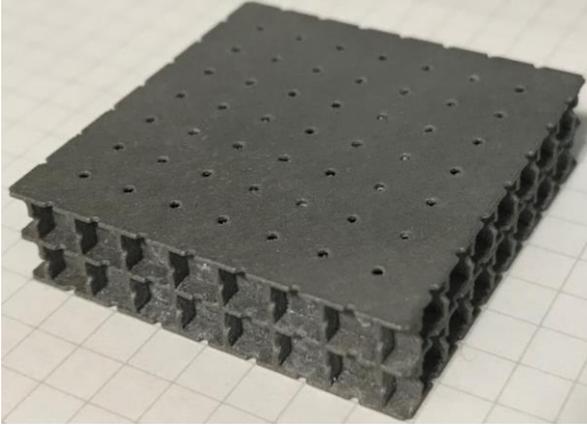
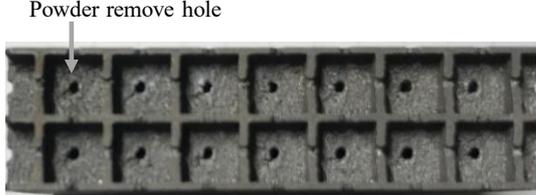
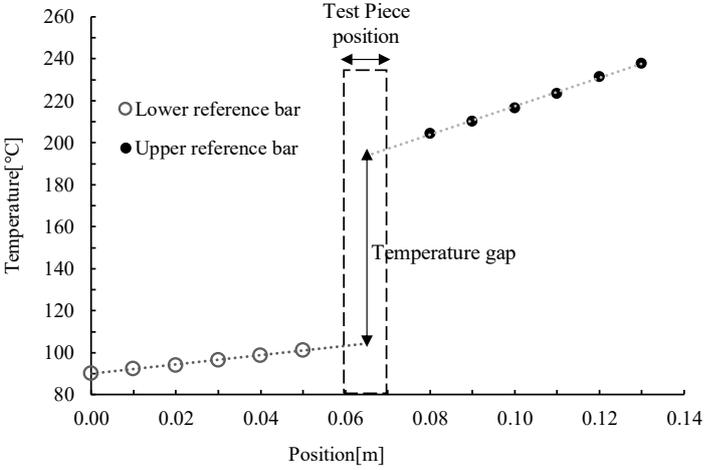
Sample No	A
General view	
Side view	
Temperature measurement result	
Powder remove hole [mm]	1.0
Simulated weight [g]	39.0
Measured wight [g]	40.9
Simulated value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	3.0
Measured value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	3.1
Error over the simulated value[%]	3.0

表 4.3 試験片 B の各種測定結果

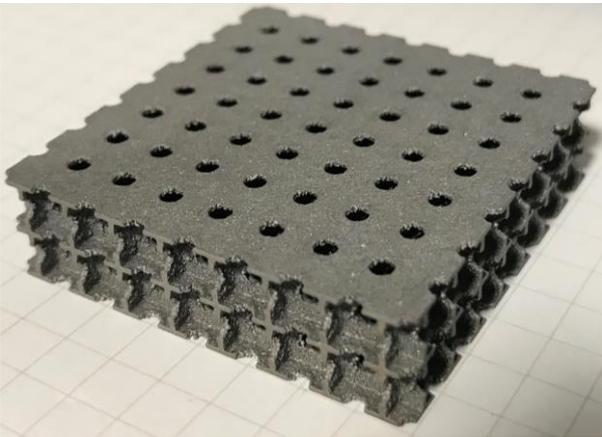
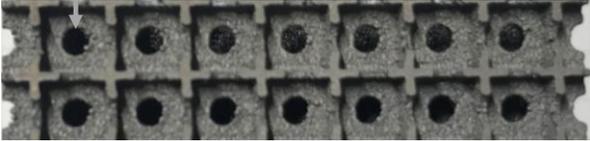
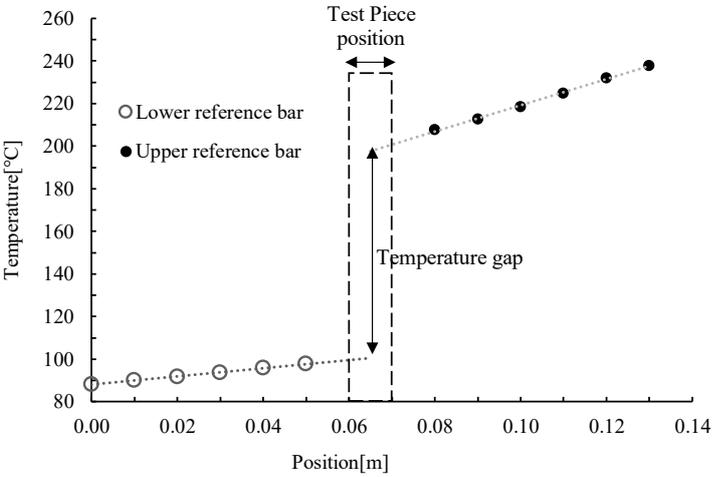
Sample No	B
General view	
Side view	<p data-bbox="683 831 879 860">Powder remove hole</p> 
Temperature measurement result	 <p data-bbox="580 1227 884 1256">○ Lower reference bar ● Upper reference bar</p> <p data-bbox="906 1093 995 1144">Test Piece position</p> <p data-bbox="959 1339 1102 1368">Temperature gap</p>
Powder remove hole [mm]	2.0
Simulated weight [g]	33.0
Measured weight [g]	36.3
Simulated value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	2.3
Measured value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	2.6
Error over the simulated value[%]	8.7

表 4.4 試験片 C の各種測定結果

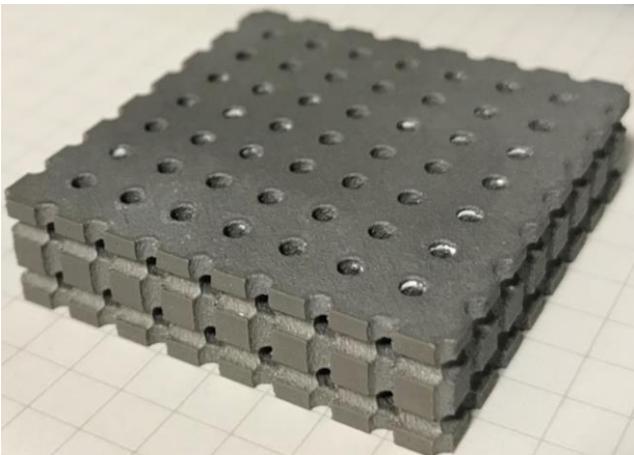
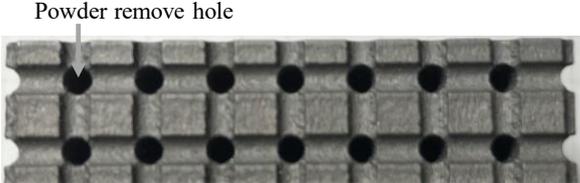
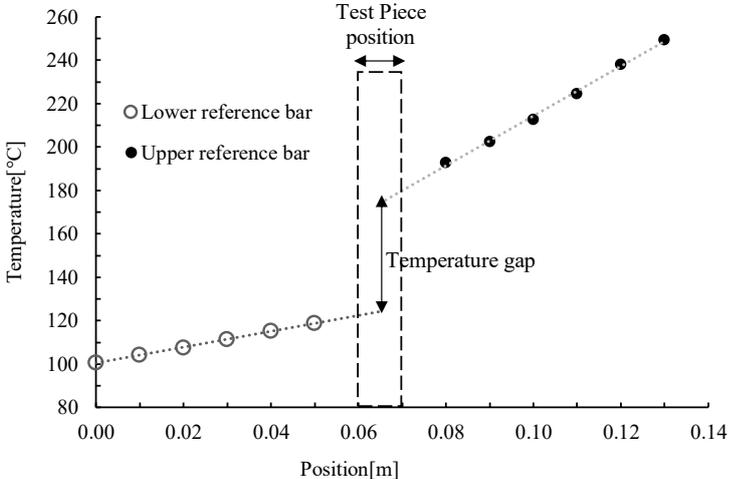
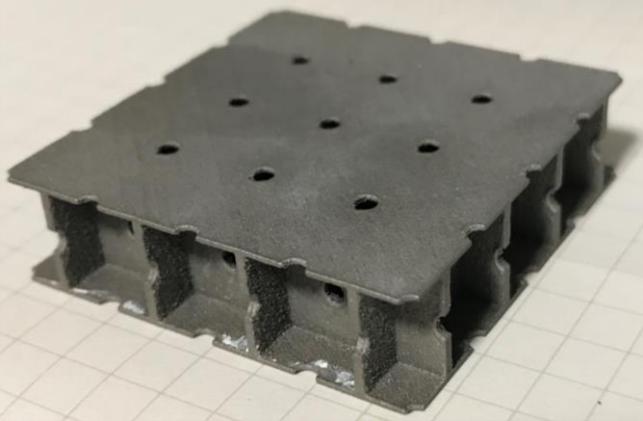
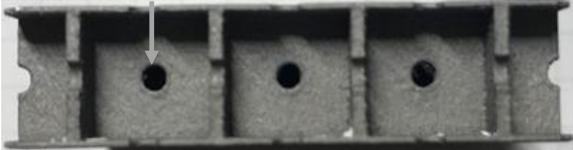
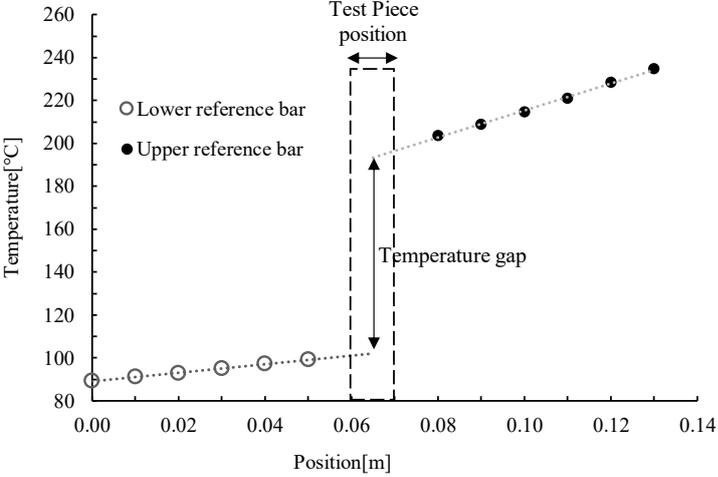
Sample No	C
General view	
Side view	
Temperature measurement result	
Powder remove hole [mm]	2.0
Simulated weight [g]	91.3
Measured weight [g]	93.1
Simulated value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	8.4
Measured value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	9.4
Error over the simulated value[%]	11.1

表 4.5 試験片 D の各種測定結果

Sample No	D
General view	
Side view	<p style="text-align: center;">Powder remove hole</p> 
Temperature measurement result	 <p style="text-align: center;">Temperature measurement result</p>
Powder remove hole [mm]	2.0
Simulated weight [g]	33.4
Measured wight [g]	31.8
Simulated value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	3.0
Measured value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	2.9
Error over the simulated value[%]	-3.0

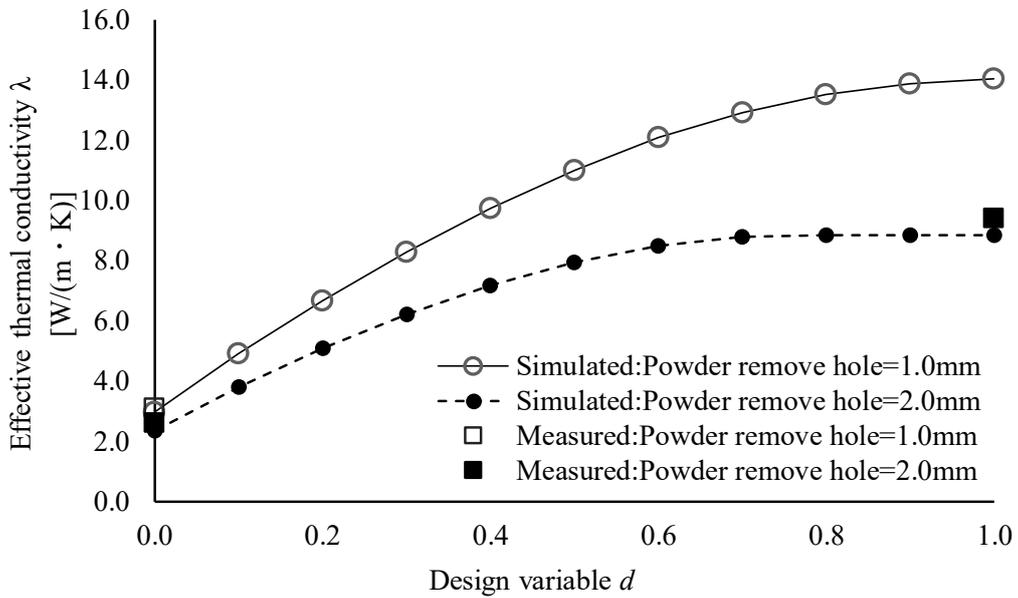


図 4.3 ユニットセル 5.0mm における実効熱伝導率の解析と実測値との差異

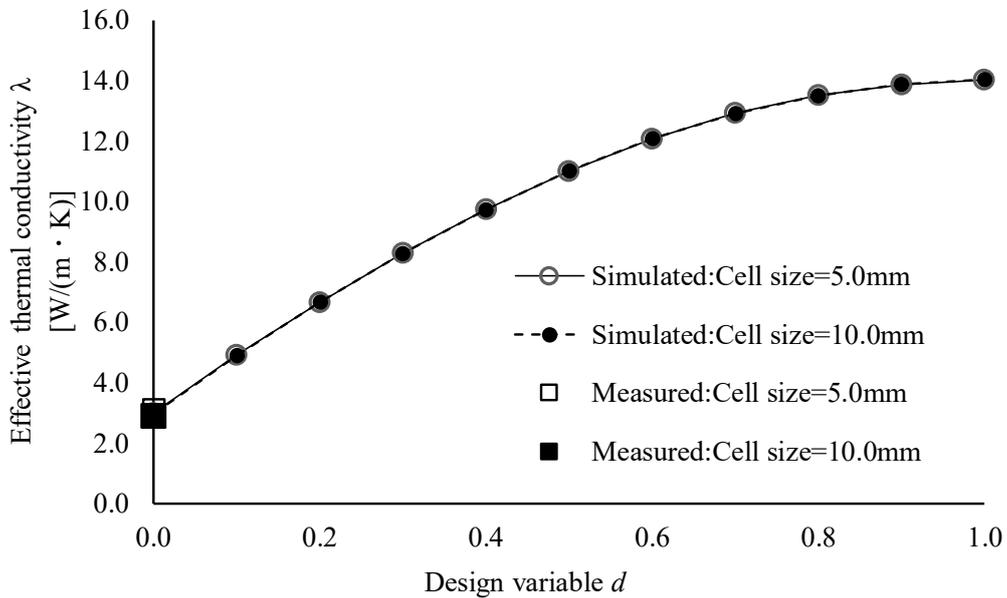
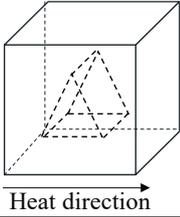
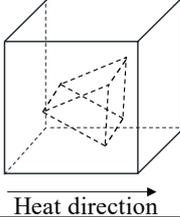
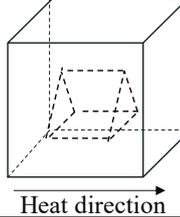


図 4.4 ユニットセル外形 5.0mm・10.0mm における実効熱伝導率の解析と実測値との差異

4.4 異方性空孔を持つユニットセルの熱伝導率測定結果

表 4.6 異方性空孔ユニットセルの形状と温度勾配方向

Sample No	E	F	G
Heat direction of unit cell			
Direction Number	1	2	3
Unit cell size [mm]	10.0		
Powder remove hole[mm]	2.0		
Design variable[mm]	0.0		

次に 3.4 節で検討した三角柱上の異方性空孔を持つユニットセルについて、これまでの検討と同様にレーザー焼結式の金属付加製造装置で造形し、実効熱伝導率を測定した。測定用のユニットセルは表 4.6 に示すように 3.4 節の解析と対応した各 3 軸方向分作成した。

各結果を表 4.7~4.9 に示す。外観上は各方向成分とも大きな詰まりや表面の粉体付着は確認されず良好な外形上が得られていた。また重量測定結果を確認すると、4.4 項の 10mm ユニットセル同様に解析上の重量に対し減少方向で程度は 2.8%~5.3%であり、等方性ユニットセルと同水準の製作性で造形されている事が確認できた。

一方で、熱伝導率の測定結果については、造形方向 2 および 3 については 4.4 項同様に解析値に対し 3.0%から 9.9%低くなる結果が得られたものの、造形方向 1 に関しては解析値に対し 12.8%増加する結果が得られた。

想定される誤差要因としては、解析時点では入熱方向以外の境界条件を対称境界設定している点、測定過程において試験片側面からの環境への放熱がセル断面形状により異なる点などがあげられる。これらの影響は等方性よりも異方性空孔の場合において顕在化しやすいと想定され、精査にあたっては、側面からの放熱条件を合せた測定や、複数の解析条件と実測を交えた考察が必要と考えられる。一方で各軸間での測定結果を比較すると優位差は確認できるため、誤差を 10%程度許容できる場合においては異方性ユニットセルも使用可能と判断した。

表 4.7 試験片 E の各種測定結果

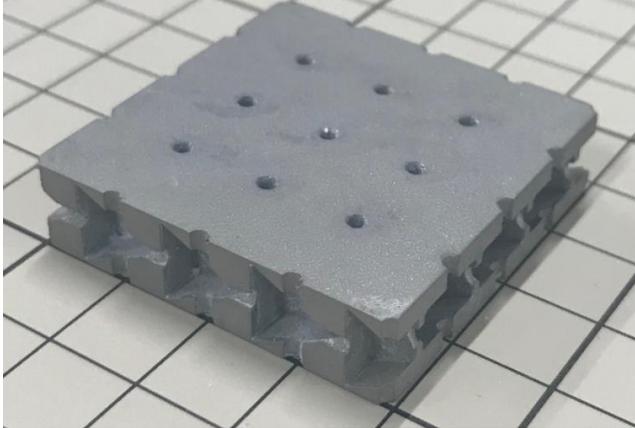
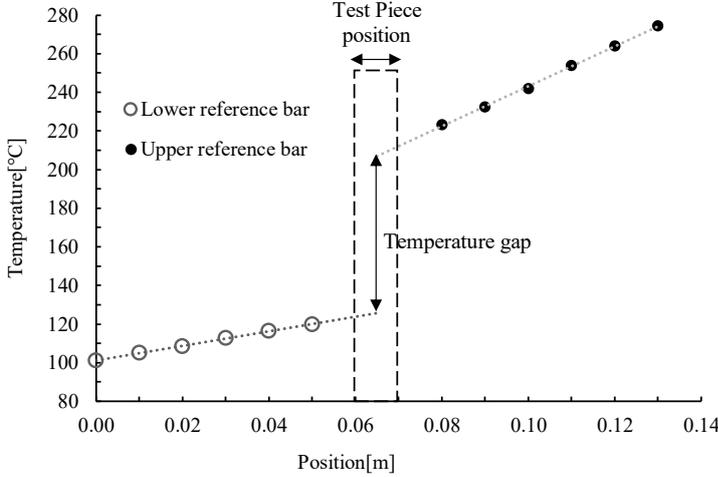
Sample No	E
General view	
Side view	<p style="text-align: center;">Powder remove hole</p> 
Temperature measurement result	 <p style="text-align: center;">Temperature measurement result</p>
Dircrection	1
Simulated weight [g]	77.8
Measured wight [g]	75.1
Simulated value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	4.7
Measured value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	5.3
Error over the simulated value[%]	12.8

表 4.8 試験片 F の各種測定結果

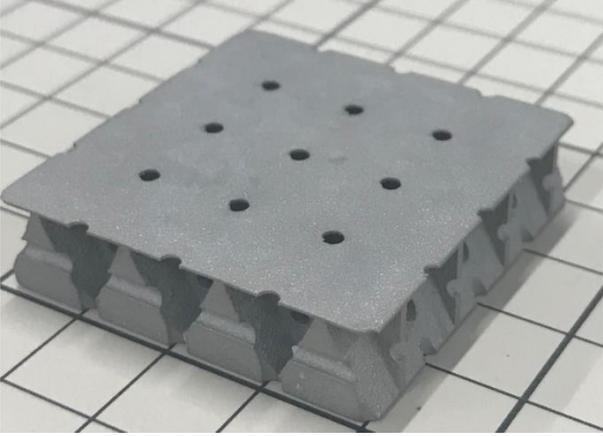
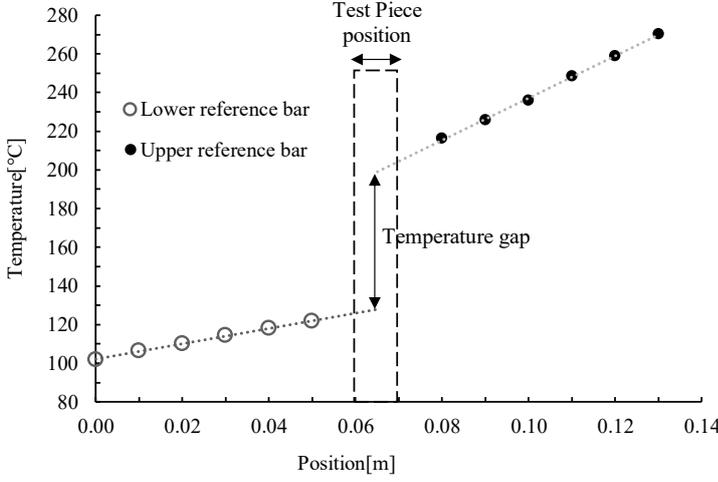
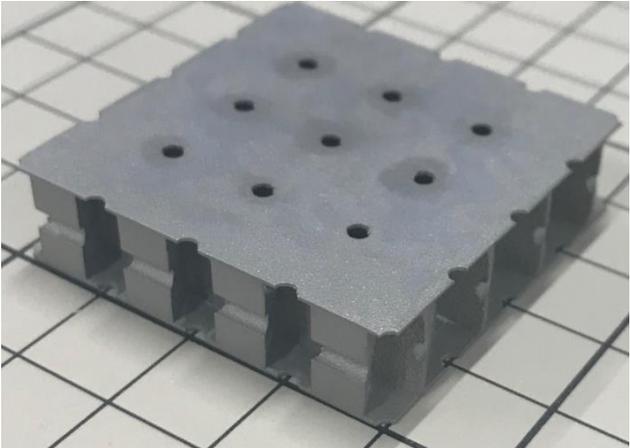
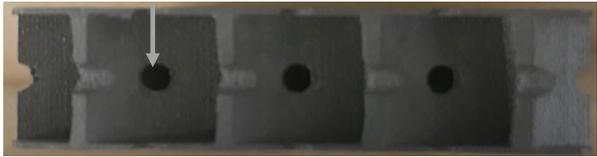
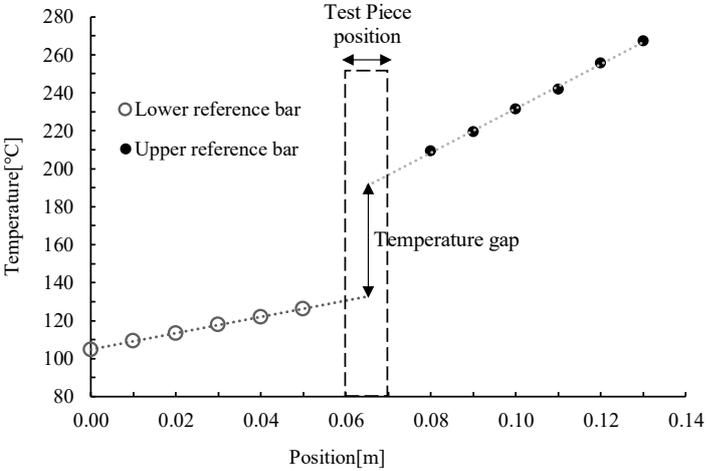
Sample No	F
General view	
Side view	<p data-bbox="727 842 927 869">Powder remove hole</p> 
Temperature measurement result	
Powder remove hole [mm]	2
Simulated weight [g]	77.8
Measured wight [g]	75.7
Simulated value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	6.6
Measured value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	6.4
Error over the simulated value[%]	-3.0

表 4.9 試験片 F の各種測定結果

Sample No	G
General view	
Side view	<p style="text-align: center;">Powder remove hole</p> 
Temperature measurement result	
Powder remove hole [mm]	3
Simulated weight [g]	77.8
Measured wight [g]	73.7
Simulated value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	9.1
Measured value of effective thermal conductivity [W/(m·K)]	8.2
Error over the simulated value[%]	-9.9

4.5 結言

本章では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付加製造装置を用い、ユニットセルから構成される試験片を付加製造した後、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。以下に要約を記す。

1. レーザー焼結式の金属付加製造装置を用いて、外形 5.0mm~10.0mm および粉抜き穴径 1.0mm~2.0mm のユニットセルから構成される 40 mm×40 mm×10 mm の試験片を作成した。
2. 熱伝導率の測定は温度傾斜法を用いた。本手法は定常法であり、複合材等の熱伝導率測定にも適用できるため、内部に空孔を持つ本研究の試験片の測定に適していると判断した。
3. 外形状の観察結果から、粉抜き穴径 1.0mm の試験片にて穴の閉塞傾向が確認された為、本方式を用いて今回以上の大型品を作成する際には、粉抜き穴径は 2.0mm 以上にするのが好ましいと判断した。
4. 試験片の重量と熱伝導率について解析結果と実測値を比較したところ、ユニットセル外径 5.0mm の場合は、実測値の方が重量・熱伝導率とも 2~10%程度大きかった。一方で、ユニットセル外径 10.0mm の場合は、実測値の方が両者とも 3%程度小さいことが確認された。
5. 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。
6. 一方で、ユニットセル外形が熱伝導率におよぼす影響については、解析上は確認されなかったものの、実測においては上記の試験片の重量差に伴い顕在化した。ユニットセル

5.0mm と 10.0mm における差異は 6%程度と低い水準であるが、今後本手法の精度をさらに高める上では、用いる付加製造手法に適した基準寸法を選定する必要がある。

7. また、異方性空孔を持つ三角柱ユニットセルについても同様に熱伝導率を測定し、3章での解析結果の通り、同一体積分率でも 3 軸各方向での熱伝導率に差異が生じる事が確認できた。一方で誤差の方向性は一部サンプルで等方性空孔時と異なる傾向が見られたため、異方性ユニットセルの活用時は等方性ユニットセル以上の誤差を想定した上での運用が必要だと考えられる。

第 5 章 ラティス密度分布最適化による金属構造体の表面温度制御

本章では、ラティス体積分率分布最適化により、構造体内の参照平面における温度分布を制御するための、熱伝導率分布の最適構造について算出した。熱伝導率の制御にあたっては、前章までに算出したラティスユニットセルの設計変数と実効熱伝導率の近似式を、構造体の熱伝導率として代入した。

温度分布制御の目的関数としては、面内の任意箇所の温度差最大化および面内温度分布の均一化について検討し、その際の熱伝導率分布と温度の制御性について評価した。また用いるユニットセルの種類を変え、実効熱伝導率の制御範囲の違いによる温度分布の制御範囲の違いについても評価した。最後に、得られた最適構造を 3D モデル化し、実効熱伝導率分布の最適構造と 3D モデルでの計算結果の差異が無いか、妥当性を確認した。

5.1 定式化

5.1.1 状態方程式

本章では 3 章および 4 章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(3.1)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 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。

$$\begin{aligned} -nh(T - T_{\text{amb}}) &= q \text{ on } \Gamma \\ -n\varepsilon\sigma(T_{\text{amb}}^4 - T^4) &= q \text{ on } \Gamma \end{aligned} \quad (5.1)$$

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 はステファーン・ボルツマン定数、 q は温度境界 Γ 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 には対流、輻射両者の境界条件を設定する。

5.1.2 ラティス体積分率分布の最適化問題

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。2.2 節で述べた通り、本方式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。その際には、ユニットセルの特性を、設計変数 $d(0 \leq d \leq 1.0)$ に対応させる必要がある。このため、本研究では 3 章で算出したユニットセルにおける設計変数 $d(0 \leq d \leq 1.0)$ と実効熱伝導率の近似式を以下の最適化問題に用いる。

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、参照平面の任意の 2 点の温度差の最大化問題と参照平面の温度分布の均一化問題を取り扱う。先ず参照平面の任意の 2 点 i, j の温度差最大化問題は以下 (5.2) 式のように表される。

$$\text{maximize } f = (T_i - T_j)^2 \quad (5.2)$$

subject to

Eqs. (3.1), (3.2) and (5.1)

$$0 \leq d \leq 1.0$$

次に、参照平面内の温度分布均一化問題においては、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 (5.3) で表される。

$$\text{minimize } f = \int (T - \bar{T})^2 dx \quad (5.3)$$

subject to

Eqs. (3.1), (3.2) and (5.1)

$$0 \leq d \leq 1.0$$

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。

5.1.3 感度解析

本手法における、目標関数の設計変数に対する感度解析について、温度分布の均一化問題を例に下記に示す。まず、熱伝導の状態方程式(3.1)を離散化すると下記のように表すことができる。

$$K(d)t = q \quad (5.5)$$

ここで K は熱伝導率マトリクス、 t は温度ベクトル、 q は熱伝導率ベクトル、 d は設計変数ベクトルである。ここで目標関数を $f(d)$ と置くと、ラグランジアンは以下のように表すことができる。

$$L = f + \lambda^T(Kt - q) \quad (5.6)$$

λ はラグランジュ未定乗数(随伴行列)である。この式(5.6)を最適化の設計変数 d で微分し、感度を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial d_i} &= \frac{\partial f}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial d_i} + \lambda^T \frac{\partial K}{\partial d_i} t + \lambda^T K \frac{\partial t}{\partial d_i} \\ &= \lambda^T \frac{\partial K}{\partial d_i} t + \left(\frac{\partial f}{\partial t} + \lambda^T K \right) \frac{\partial t}{\partial d_i} \end{aligned} \quad (5.7)$$

一方で2次項が0の時、感度は $\lambda^T \frac{\partial K}{\partial d_i} t$ となる。この際には、 λ は下記の随伴方程式を満たす必要がある。

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \lambda^T K = 0 \quad (5.8)$$

式(5.8)の計算に際しては、目標関数 $f(d)$ を離散化すると、下記のように表すことができる。

$$f = \left\{ h^T \left(t - \frac{1}{N} h^T t \right) \right\}^2 \quad (5.9)$$

ここで h は設計領域における温度の基本ベクトルである。

5.2 数値例

次に数値例により、本計算手法の妥当性について評価する。解析モデルは図 5.1 に示すように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。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 $130.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 相当の 403.2 K 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 $\varepsilon=0.94$ 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 2.0 mm 分は設計領域から除外した。

設計領域は 4 章および 5 章で設計された外形一辺 5.0 mm かつ粉抜き穴径 2.0 mm もしくは 1.0 mm 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。実効熱伝導率の制御範囲としては、3.3.1 項で述べた通り、粉抜き穴径 1.0 mm の場合、設計変数 $0 \leq d \leq 1.0$ に対して、実効熱伝導率は $3.0 \leq \lambda \leq 14.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、粉抜き穴径 2.0 mm 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 $2.3 \leq \lambda \leq 8.9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ である。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 $\rho_0=0.5$ とした。

また、最適構造の性能を評価するため、リファレンス条件として、外形寸法が図 5.1 と同等で密度分布が一様なバルクの構造体について、上記説明で示した境界条件と同等の条件で解析し、目標関数の解析結果について比較し。

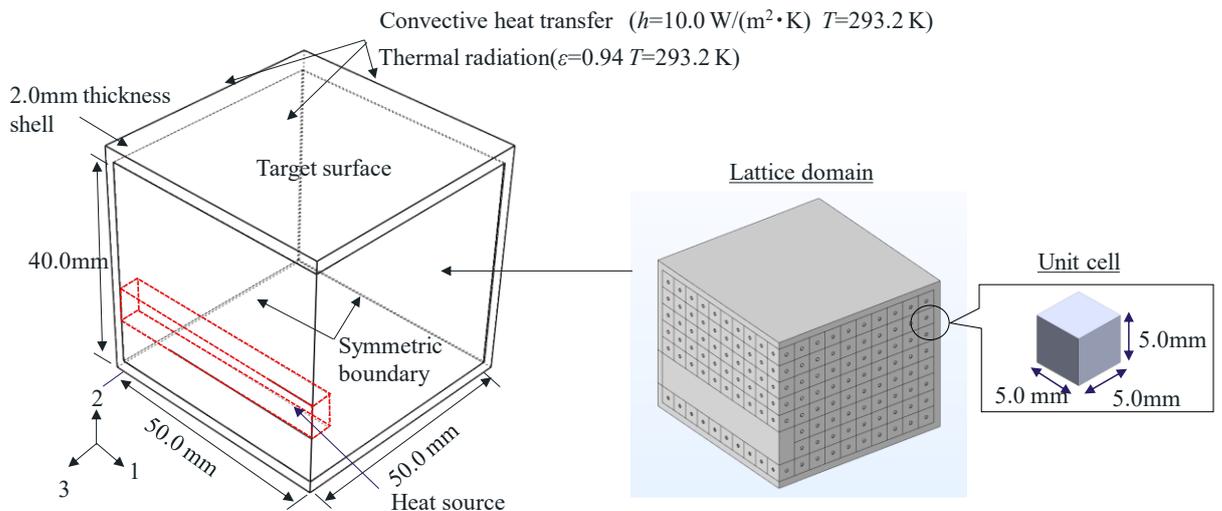


図 5.1 3D 解析モデルおよび解析時の境界条件について

5.2.1 面内温度分布の最大化

まずは参照平面内の任意の 2 点の温度差を最大化させる最適構造について検討した。温度差を比較する参照点としては、表 5.1 に示す (i) および (j) を選定した。この 2 点は熱源からの直線距離が同一である為、周辺の境界条件の差異はあるものの一様の熱伝導率分布の条件下では、温度差が生じにくい位置関係である。この為、このような制約を持つ構造体において、内部の熱伝導率分布の最適化で温度差を任意に制御する事が可能になれば、工業分野での応用範囲が広がると期待できる。

まず、粉抜き穴径 2.0mm の場合について計算した。目標関数の収束履歴を図 5.2 に示すが、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。リファレンスと最適構造の熱伝導率分布および温度差の計算結果について表 5.1 左に示す。リファレンスでは、上述の通り、設計領域内の熱伝導率分布が一定条件下かつ熱源から参照点の距離が同一である為、温度差としては 3.2K と小さい結果が得られた。温度差が生じた原因としては壁面の対流熱伝達および輻射による放熱分の寄与が挙げられる。

一方で最適構造の計算結果について表 5.1 右に示す。まず熱伝導率分布について、高温側に設定した点 (i) と熱源との熱伝導率は、制御範囲の中でもっとも高い 8.9 (W/m・k) に最適化された一方で、低温側に設定した点 (j) と熱源の熱伝導率は、制御範囲の中でもっとも低い 2.3 (W/m・k) に最適化された。さらに、低温側は熱源からもっとも遠い壁面の熱伝導率が高

く設定され、壁面の放熱を促進させる解析結果となった。これらの熱伝導率分布の最適化により、温度差は 15.4K となり、リファレンス条件に対し約 4.8 倍の温度差となった。

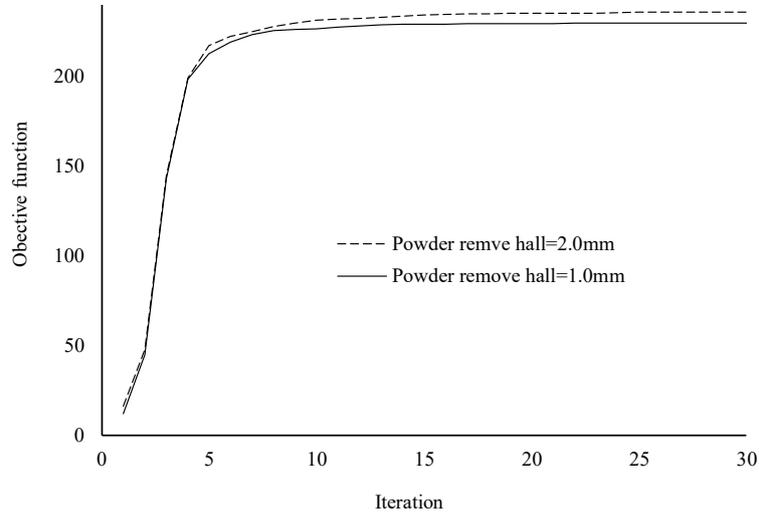


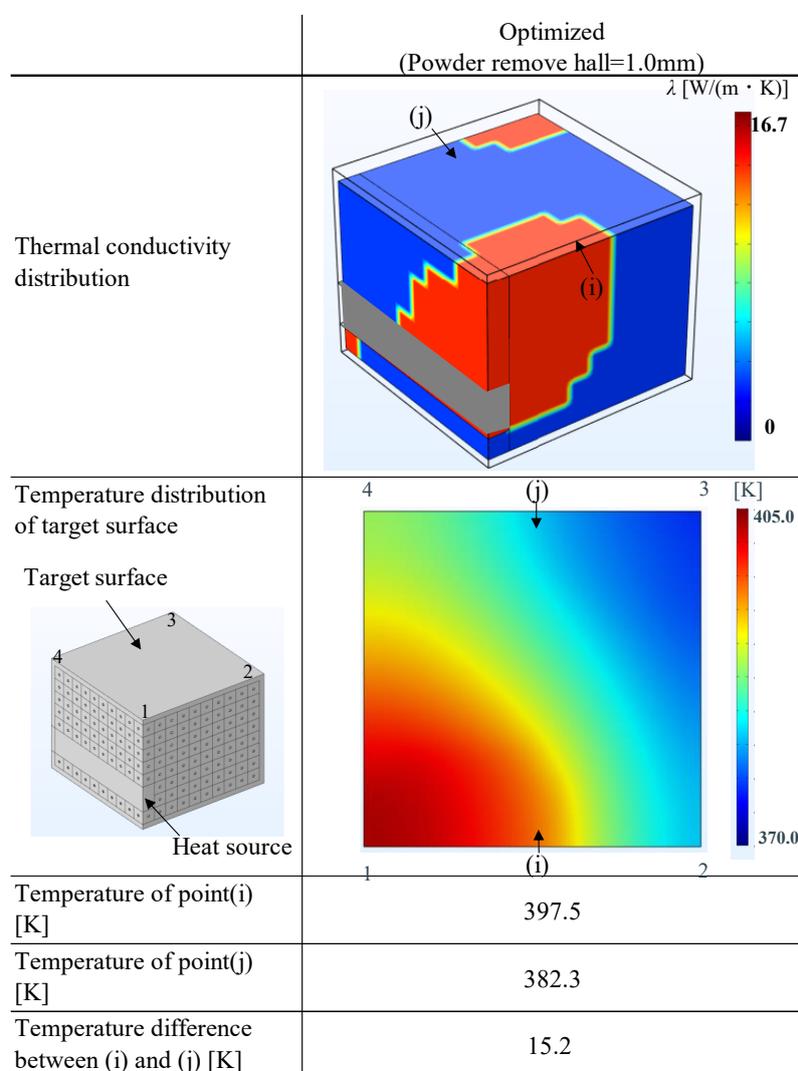
図 5.2 面内温度分布の最大化における目的関数の収束履歴

表 5.1 面内温度分布の最大化問題についての最適化結果(粉抜き穴 2.0mm)

	Reference	Optimized (Powder remove hall =2.0mm)
Thermal conductivity distribution		
Temperature distribution of target surface		
Temperature of point(i) [K]	400.3	395.8
Temperature of point(j) [K]	397.1	380.4
Temperature difference between (i) and (j) [K]	3.2	15.4

次に粉抜き穴径 1.0mm の場合について計算した。目標関数の収束履歴は図 5.2 に示す通り、滑らかに収束し、2.0mm の時と同様に 30 回の反復回数で収束と判断した。最適構造の計算結果について表 5.3 に示すが、熱伝導率分布は粉抜き穴 2.0mm のケースと傾向は同等であるが、熱伝導率の最大値および最小値が実効熱伝導率の制御範囲変更により変わっていた。一方で、温度分布としては、面内最大温度は 403.2K と同等としていたものの、熱伝導率の向上により最大値側の温度が 2K 程度上昇するとともに最小値側も同程度底上げされてしまい、温度差としては粉抜き穴径 2.0mm とほぼ同等の 15.2K という結果が得られた。

表 5.2 面内温度分布の最大化問題についての最適化結果(粉抜き穴 1.0mm)



5.2.2 面内温度分布の均一化

次に参照平面内の温度分布の均一化させる最適構造について導出した。金属構造体表面の温度均一化については金型での成形品質向上含め応用範囲が広く、こちらも確立できれば工業分野への高い貢献が見込める技術である。境界条件は5.2節の前段で述べたものを用いるとともに、目標関数については(5.3)式を用いた。また、最適構造の能力評価にあたっては前項と同様に、熱伝導率分布の一樣の構造体をリファレンスとして、参照平面内の温度分布を比較した。

まず、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5.3左に示す。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、熱源からの距離が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。

次に、ユニットセルの粉抜き穴径が2.0mmを用いた際の温度分布最適化結果について示す。最適化における目標関数の収束履歴は図5.3に示す通り、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。最適構造については表5.3右に示す通り、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。

次に粉抜き穴径1.0mmにおける温度分布最適化結果について示す。まず目標関数の収束履歴は図5.3に示す通り、滑らかに収束し、粉抜き穴径2.0mmの時と同様に30回の反復回数で収束と判断した。最適構造について表5.4に示すが、熱伝導率分布は粉抜き穴2.0mmのケースと傾向は同等であるものの、温度差としては5.1Kとなり、リファレンスに対して温度差の改善は48%程度と大きくなった。粉抜き穴径1.0mmの方が熱伝導率の制御範囲が広く、熱源から低温側に繋がる高熱伝導率部の熱量が増えたためと考えられる。

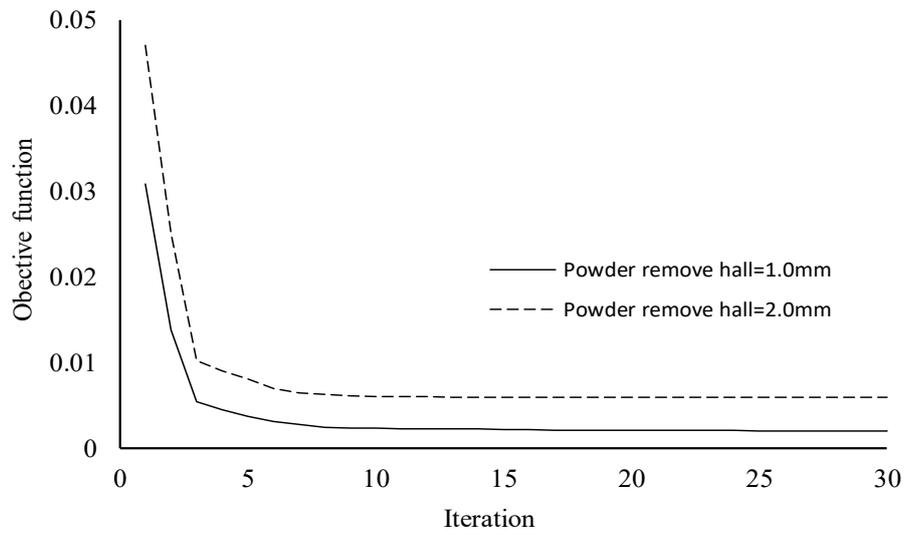
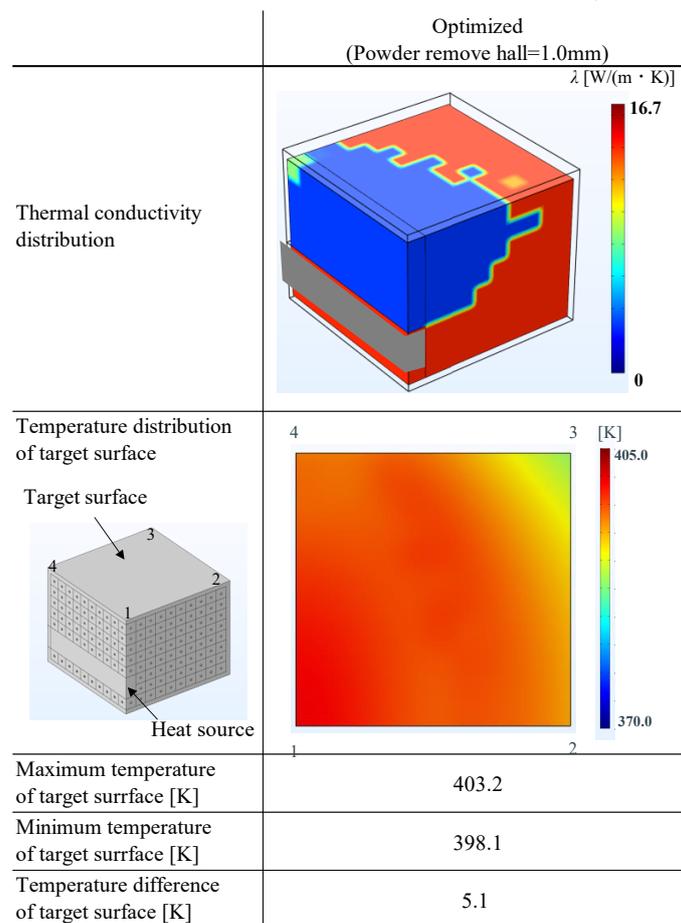


図 5.3 面内温度分布の最小化問題における目的関数の収束履歴

表 5.3 面内温度分布の最小化問題についての最適化結果(粉抜き穴 2.0mm)

	Reference	Optimized (Powder remove hall =2.0mm)
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

表 5.4 面内温度分布の最小化問題についての最適化結果(粉抜き穴 1.0mm)



5.3 3D モデルを用いた最適化計算の妥当性確認

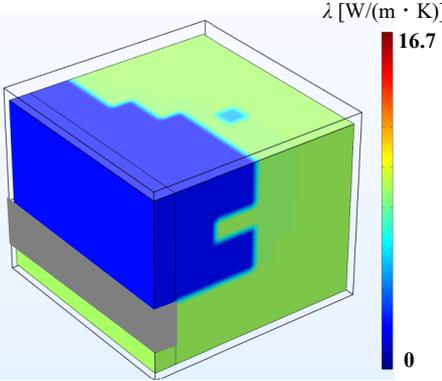
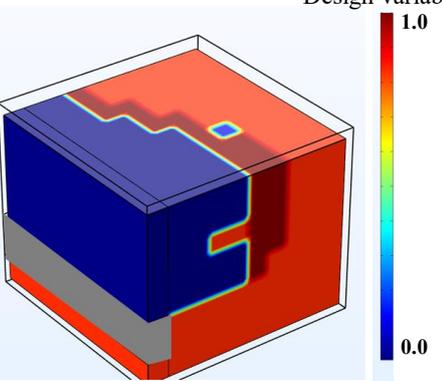
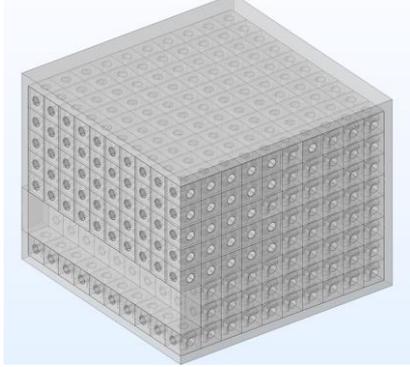
前節まで、実効熱伝導率分布に対する温度分布の対比を示してきたが、実際に付加製造装置で最適構造を造形する際は、各ユニットセルに割り当てられた熱伝導率をユニットセルの外形状へと対応させた 3D モデルに変換する必要がある。そこで今回は温度分布均一化問題を対象に最適構造の 3D モデル化を以下のように検討した。

前節で述べた通り、今回実効熱伝導率分布の最適化にあたっては、各ユニットセルの内部空孔の代表長さを設計変数として計算している。この為、表 5.5 に示す通り、熱伝導率分布の最適化にあたっては、設計変数の分布についても最適分布が得られている。3D モデル化にあたっては、各ユニットセルに格納されている設計変数を用いる。具体的な手順としては、COMSOL Multiphysics での最適化後の計算結果を用いて、各ユニットセルの設計変数をユニットセルの座標を指定し抽出してデータテーブルを作成し、その情報を基に再度 COMSOL Multiphysics にて、粉抜き穴径等も加味しながらモデリングした。その工程を経て表 5.5 下に示す 3D モデル

が得られた。3Dモデル化にあたっては、粉抜き穴径は2.0mmの条件を選定した。これは、実際の造形を見据えた際、4章の結果から粉抜きの問題等を踏まえると、より製作性の高い条件でまずは検討する必要があると判断した為である。

作成した3Dモデルの詳細断面構造を図5.5に示すが、最適化計算結果に沿って、熱伝導率の異なるユニットセルが各層で最適配置されている事が確認できた。

表 5.5 最適化後の温度分布，設計変数分布，および3Dモデル

	Optimized structure for uniforming temperature distribution
Thermal conductivity distribution	 <p style="text-align: right;">λ [W/(m · K)]</p> <p style="text-align: right;">16.7</p> <p style="text-align: right;">0</p>
Design variable distribution	 <p style="text-align: right;">Design variable</p> <p style="text-align: right;">1.0</p> <p style="text-align: right;">0.0</p>
Full 3D model	

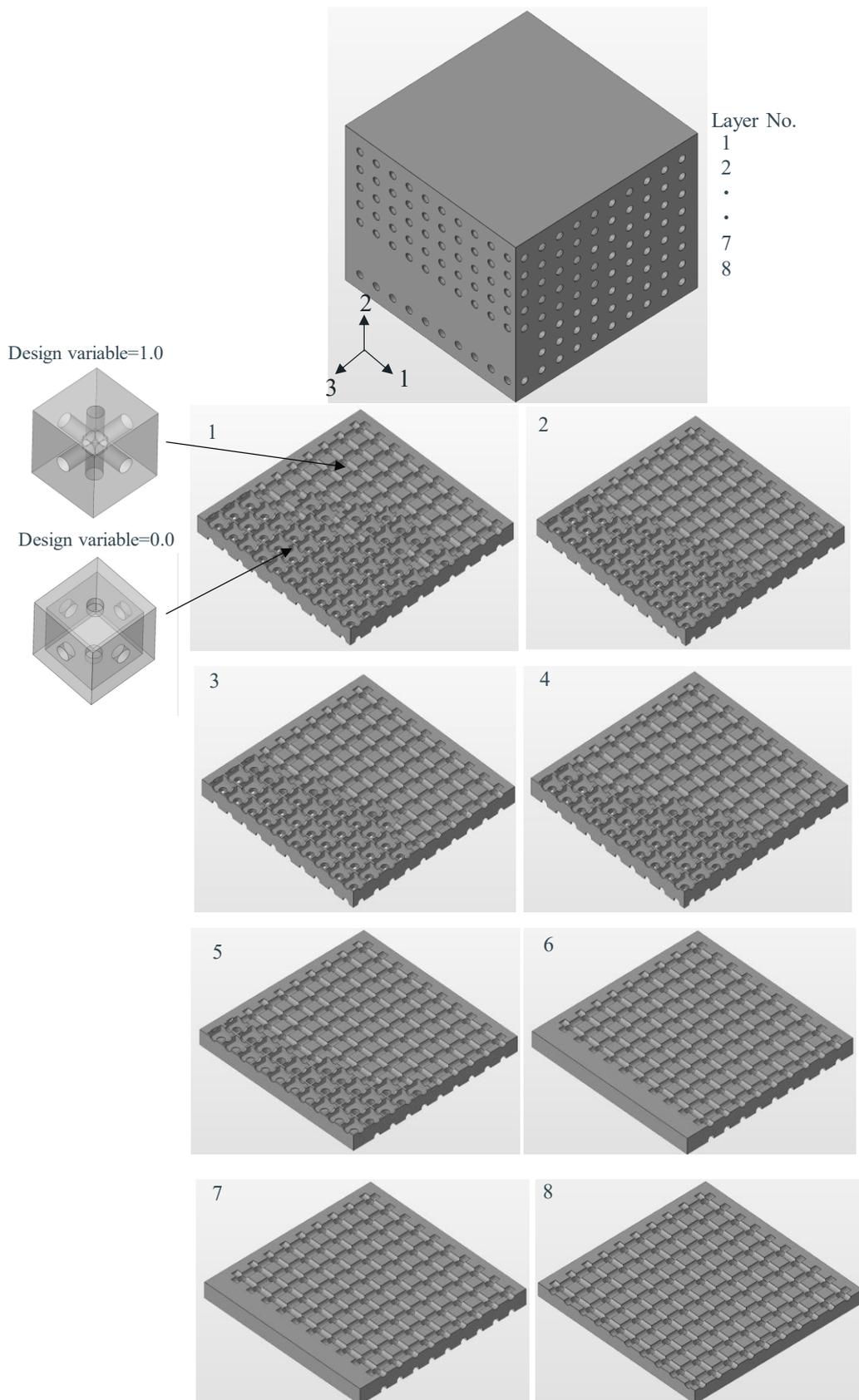


図 5.5 温度分布最適化 3D モデルの各層の断面図

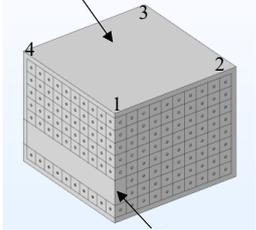
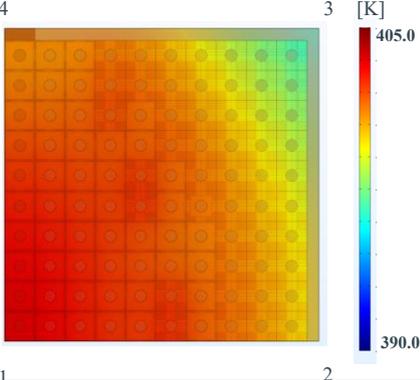
次に、前節の最適化計算と同様の境界条件を 3D モデルに与えて解析を行い、近似モデルとの結果を比較し 3D モデル化工程の妥当性を検証した。比較に際し、表 5.6 に近似モデルおよび 3D フルモデルの自由度、解析モデル、メッシュ条件の差異を記す。

解析結果を表 5.7 に示す 5.3.2 項で示した近似モデルでの面内温度差が 7.0K であったのに対し、3D モデルによる解析ではほぼ同等の 7.3K という結果が得られた。この結果により、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と判断した。

表 5.6 近似モデルおよび 3D フルモデルの解析モデル条件

		3D numerical model	3D full model
Number of degree of freedom		22888	3343914
Discretization		Quadratic Lagrange	Quadratic Lagrange
Number of elements	Tetrahedra	2998	1072984
	Pyramids	369	
	Hexahedra	800	
	Triangles	1601	47566
	Quads	620	
	Edge elements	338	107955
	Vertex elements	32	29462

表 5.7 3D フルモデルの温度分布解析結果

	Optimized structure for minimizing temperature distribution
Temperature distribution of target surface 	
Maximum temperature of target surface [K]	403.2
Minimum temperature of target surface [K]	395.9
Temperature difference of target surface [K]	7.3

5.4 結言

本章では前章までに設計・製作した立方体空孔のラティスユニットセルを用いて、構造体内の熱伝導率分布を制御し参照平面の温度分布を制御する最適構造について、ラティス体積分率分布最適化により導出した。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。以下に要約を記す。

1. ラティス体積分率分布最適化にあたり、ユニットセルの熱伝導率は前章で得られたユニットセルの設計変数と実効熱伝導率の近似式をもとに算出した。
2. 参照平面における任意の 2 点の温度差を最大化させる最適構造については、リファレンスの密度分布一様条件では 3.2K だったのに対し、最適化後は 15.4K まで差分を拡大させる事が出来た。
3. 参照平面内の温度分布の均一化にあたっては、熱源に近い熱伝導率を下げると共に、離れた箇所の熱伝導率を上げる事で、約 30%程度の改善効果が確認出来た。ユニットセルの熱伝導率制御範囲による、最適化時の効果の差異については、均一化において顕著に確認された。
4. 得られた熱伝導率分布の最適分布結果を元に、3D モデル化を行い、計算手法の妥当性について評価した。その結果、近似計算と 3D モデルの計算で 5%程度の誤差に収まっている事が確認された。
5. 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と判断した。

第 6 章 金属付加製造による最適構造の製作性確認と能力評価

本章では、第 5 章で作成したラティス体積分率分布最適構造の 3D モデルデータをレーザー焼結式の金属付加製造装置で造形した後、造形体について CT スキャン等を用いて、モデルデータに対する造形体の製作性について詳しく評価した。また、サーモビューワ等を用いて造形体の温度分布を測定し、解析結果の妥当性を評価した。

6.1 レーザー焼結式の金属付加製造装置による最適構造設計品の造形

金属付加製造での造形にあたり、5 章で製作した 3D モデルは対称境界により 1/4 サイズのモデルであったため、これを図 6.1 に示すように 1/1 サイズに変換した。造形体の大きさは 104mm × 104mm × 44mm とした。ユニットセルは外径 5.0mm、粉抜き穴径 2.0mm の物を用いて、5.5 に示した温度分布平均化後の最適構造にて造形した。3D モデルデータ内部断面を図 6.2 に示すが、熱源の近辺に熱伝導率の低いユニットセルが配置され、熱源から離れた箇所に熱伝導率の高いユニットセルが配置されている事が確認できる。造形材料は、ステンレス系を用いるとともに、装置については 3D Systems 社 ProX300 を用いた。

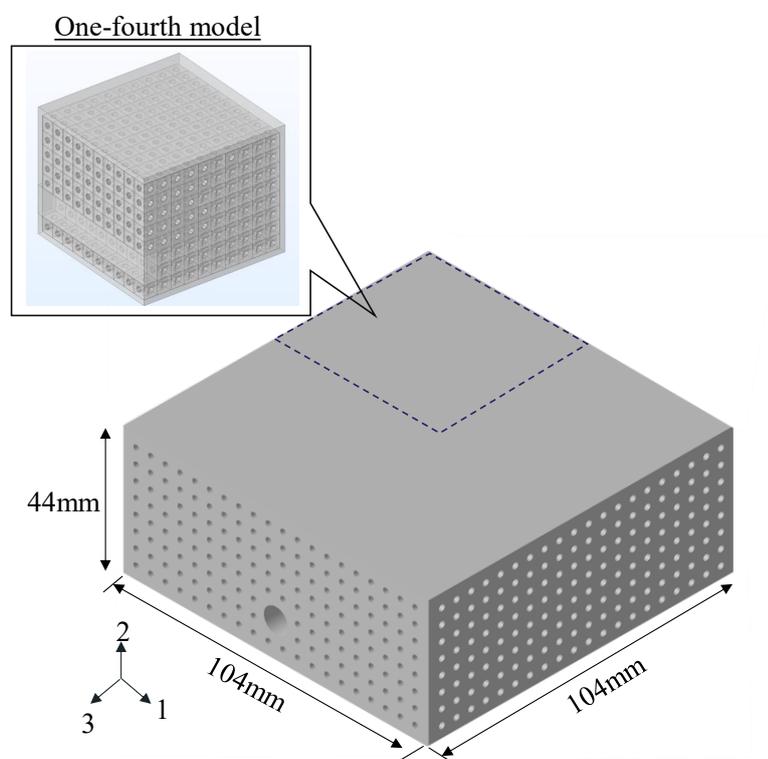


図 6.1 実性能評価用の 3D モデルデータ外形

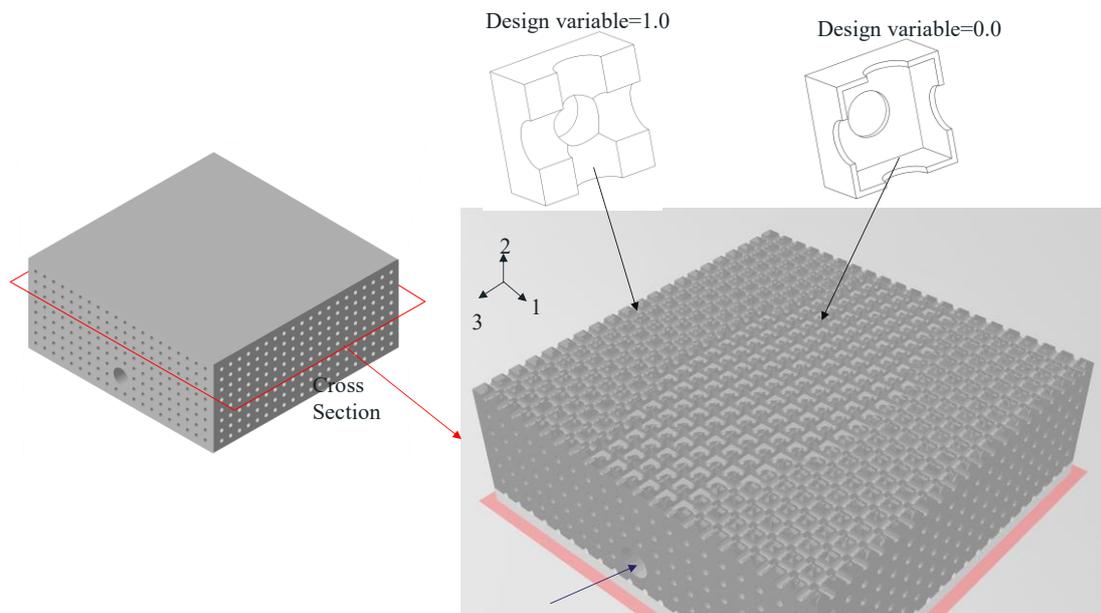


図 6.2 実性能評価用の 3D モデルデータ内部断面



図 6.3 金属付加製造による造形体の外形（黒体塗料塗布後）



図 6.4 金属付加製造による造形体の側面（黒体塗料塗布後）

図 6.3 および図 6.4 に造形体の外形写真を示す。造形物表面にはこの後の温度分布測定に向け、黒体輻射塗料を塗布した。外形状を確認する限りにおいては、全体として割れ無く粉抜き穴も大きな潰れなく製作も出来ている事が確認出来た。造形物の外形寸法は設計値 104mm×104mm×44mm に対し、103.8mm×103.9mm×44.1mm と一般的なレーザー焼結式の金属付加製造の精度を満たしている事も確認出来た。

6.2 CT スキャンを用いた造形体の評価

次に造形体内部の製作精度について評価する為、CT スキャンで内部形状を観察し、元の 3D データとの差異を評価した。CT スキャンでの内部測定にあたっては、造形体が 100mm 以上と大きいことの兼ね合いもあり、図 6.5 に示す通り観察用に試験片を切り出した上で観察した。CT 機器は Baker Hughes 社 vltomelx m300 を使用した。形状の評価方法については、今回の設計の中でも微細且つ熱伝導特性上重要である、粉抜き穴、ユニットセルの内部空孔寸法および形状について 3D データと対比させて確認した。また、造形体内の空孔率についても確認した。

先ず、粉抜き穴の観察結果について図 6.6 に示す。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⁶⁸⁾を踏まえると、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 6.7)。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、角部の設計の面取り等の修正により、今後改善を進める。

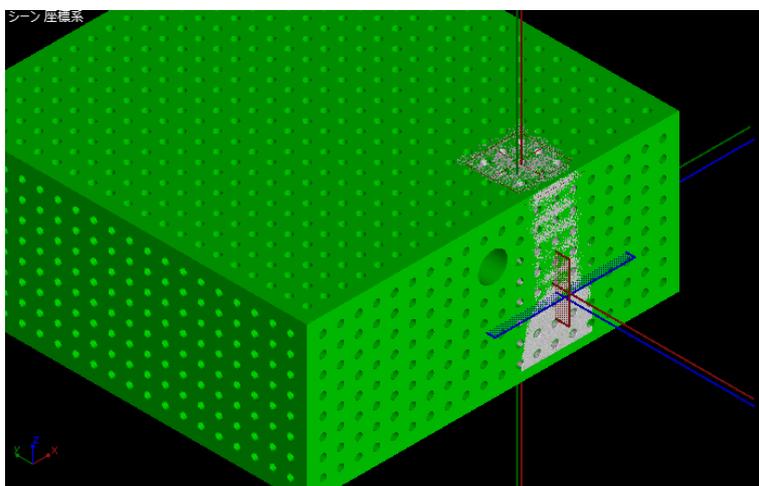


図 6.5 CT 測定での切り出し部

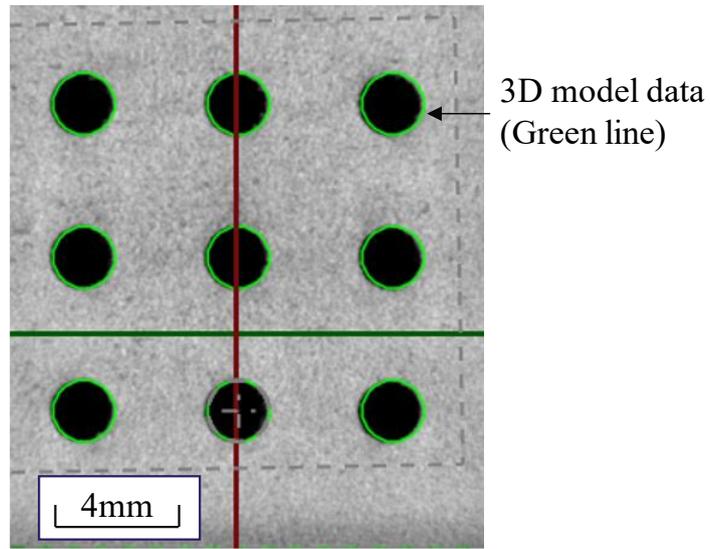


図 6.6 CT での粉抜き穴観察結果

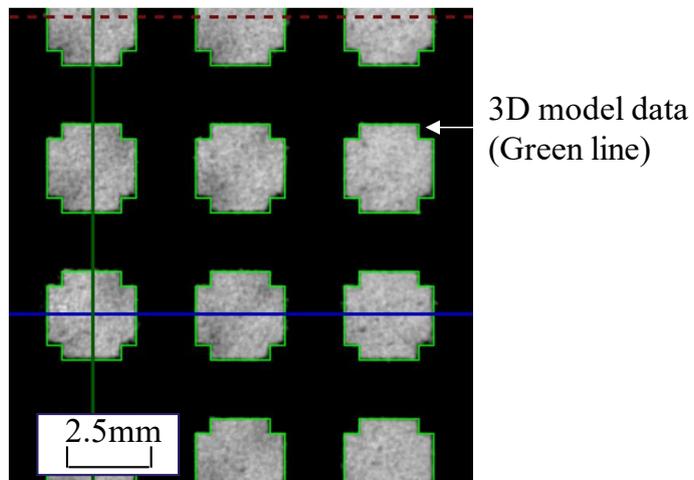
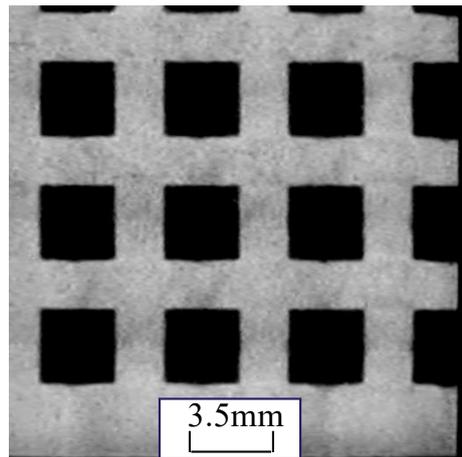


図 6.7 CT での内部空孔観察結果

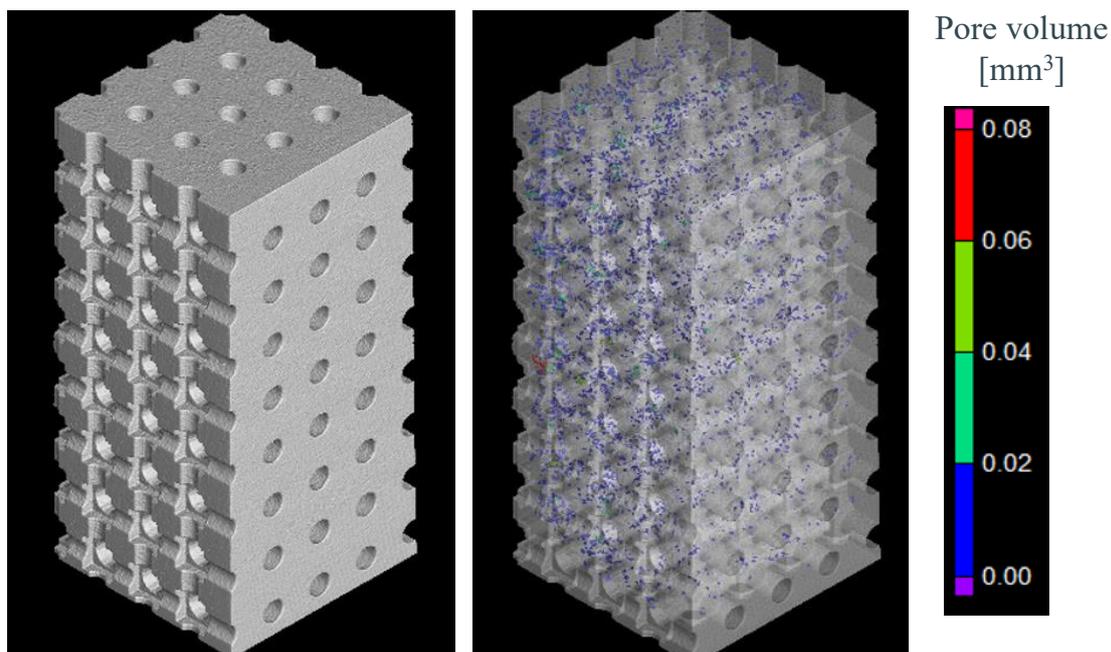


図 6.8 CT での内部空孔分布観察結果

次に CT 撮影による欠陥解析の結果を図 6.8 に示す。造形体内部には体積 0.01mm^3 の空孔(図 6.8 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、PBF による造形された試験片の評価事例等と比較しても同等以上に緻密な構造体が得られていることが確認できた⁶⁹⁾⁷⁰⁾。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。

6.3 実証実験での温度測定方法

次に造形体の性能確認の為、加熱後の参照平面の温度分布測定を行った。サーモビューアおよび接触式の熱電対を用いて行なった。温度分布測定の実験系を図 6.9 に示す。熱源としてφ 8.0 mm, 250W のカートリッジヒーターを構造体内部に挿入し、構造体の参照表面の最高温度が解析と同様に約 130 °C (403 K) になるように加熱した。また、解析の境界条件と同等の熱的環境を再現するために、底面には厚さ 25 mm の断熱材を設置すると共に、実験は強制対流などが伴わない約 20 °C の安定した室内環境で行った。構造体表面には放射率 $\epsilon=0.94$ の黒体塗料を塗り、造形体の表面性状や色味の影響を極力排した。評価用の構造体として上述の最適構造の付加製造体、最適化前のリファレンスとして SUS316-L のバルク構造体の 2 サンプルを用いた。

参照平面全体の温度分布の標準偏差についてはサーモビューアの結果を用いて評価した。一方、参照平面内の最高温度・最低温度については接触式の熱電対での測定値を用いて評価した。これは事前の測定検証において、サーモビューアと接触式の熱電対で測定値に 7 K~10 K 程度の差異が確認されたことから、サーモビューアの結果は周辺環境の反射等の影響を受ける可能性を考慮したからである。今回使用したモデルは定常状態での最適構造である点を踏まえ、温度分布評価にあたっては、解析上最も温度の低い参照平面端部の温度上昇が収束したと判断されるまで 1 時間 30 分間加熱した後の測定データを用いた。

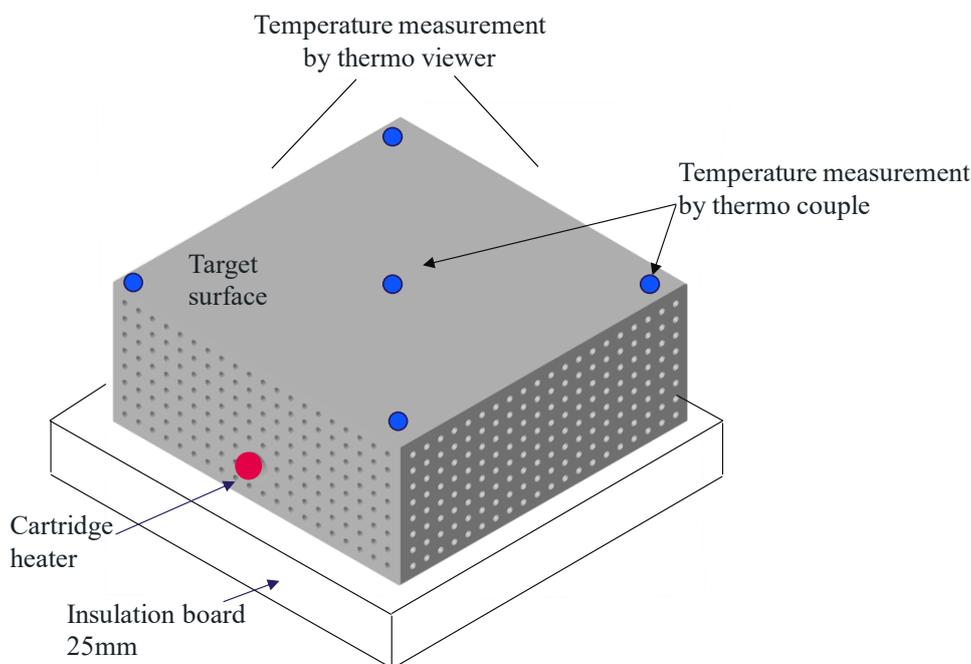


図 6.9 温度分布測定実験概略図

6.4 温度分布測定結果と考察

先ずサーモビューアーによる温度測定結果を表 6.10 に示す。参照平面全体の温度分布として、リファレンスよりも最適構造の方が高温部の面積が大きいことが確認され、5.3.2 章での解析結果と同等の傾向が確認された。また、参照平面内温度の標準偏差を比較すると、最適化前の 3.2 K に対し、最適化後では 2.3 K と 28%の改善効果が得られたことが確認された。

次に、熱電対で測定した参照平面内の最高温度と最低温度の差分を評価し、5.3.2 章の解析結果との差異について確認した(表 6.11)。温度測定の結果、リファレンスの温度差が 10.2 K であるのに対し、最適化後は 6.9 K と 32%の改善効果が確認された。これを解析結果と比較すると、±5%程度の差異に収まっており、非常に精度よく再現が出来ていた。

以上の結果より、本研究の設計手法は、参照面内の温度均一性を向上させる最適化設計手法として実用に足ると判断した。一方で、今回解析において熱伝達係数や輻射による影響を加味していたが、その境界条件の設定次第でも解析上の温度分布改善の程度はある程度変わると想定される。また、4 章でのユニットセルの能力評価で解析と実測定で 10%程度の誤差があった点や本章での付加製造体の精度等も踏まえると、設計にあたって適切な境界条件設定と 10%程度の造形誤差を考慮した上で、本手法を用いるのが適正だと考えられる。

表 6.10 サーモビューアーによる最適化前後の温度分布測定

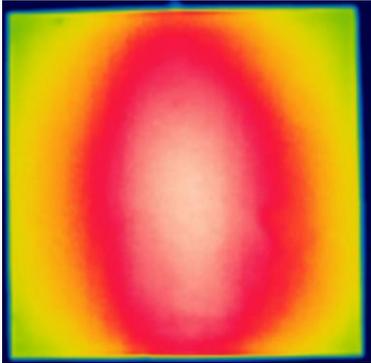
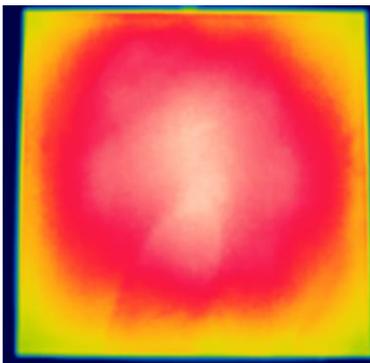
	Reference	Optimized
Thermo viewer picture of target surface ($\varepsilon=0.94$)		
Standard deviation of target surface temperature[K]	3.2	2.3

表 6.11 熱電対による温度分布測定結果

		Reference	Optimized
Measured by thermo couple	Maximum temperature of target surface [K]	404.0	403.3
	Minimum temperature of target surface [K]	393.8	396.5
	Temperature difference of target surface [K]	10.2	6.8
Simulated resultd	Maximum temperature of target surface [K]	403.2	403.2
	Minimum temperature of target surface [K]	393.5	396.1
	Temperature difference of target surface [K]	9.7	7.1
Error over the simulated value[%]		5.2%	-4.2%

6.5 結言

本章では、第 5 章で設計した温度分布均一化最適構造の 3D モデルデータをレーザー焼結式の金属付加製造装置で造形した上で、造形体の製作精度の確認および、温度分布を測定し、解析結果の妥当性を評価した。以下に要約を記す。

1. 5 章で設計した 1/4 分割モデルデータは、1/1 サイズの 44mm×104mm×104mm に変換した上で、レーザー焼結式の金属付加製造装置で造形した。
2. CT スキャンでの造形体内部評価では、元の 3D モデルデータに対し主要な形状は 0.1~0.2mm 程度の製作誤差で造形出来ていた。また、内部の空孔欠陥分布を測定したところ、0.02mm 程度の微小な空孔の点在は確認されたもの、全体としては 99.6%と比較的高い造形密度が達成出来ていた。
3. 造形体の温度分布は、サーモビューアでの温度分布偏差確認と、熱電対による温度差測定により評価した。
4. 温度分布測定の結果、リファレンスから最適構造の改善程度としては約 30%であった。解析結果と実測結果の差異としては±5%程度と高い再現性が確認された。

5. 以上の結果より、本研究の設計手法は、参照面内の温度均一性を向上させる最適化設計手法として実用に足ると判断した。

6. 一方で、実用にあたっては、解析結果自体は放熱の境界条件次第で結果が変わる点や、4章でのユニットセルで解析と実造形体の能力が10%程度の差異があった点を考慮して、設計を進める必要がある。

7章 結論

工業分野において、付加製造 (Additive Manufacturing) 技術の実用部材への適用が加速しており、構造最適化と組み合わせた高性能な機器や部材の開発が近年進んでいる。一方で、構造最適化により設計された高性能かつ複雑な形状を付加製造で製作する際には、付加製造の製法に起因する形状制約を考慮した設計変更が必要になるなど、実用面で課題が多い。このような付加製造向けの設計は Design for Additive Manufacturing(以下 DfAM)と呼ばれている。この DfAM の標準化や実用上の課題については、2018 年に AMSC (America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative)が網羅的に纏めており、基本的な設計則などの整備は適宜進んでいるものの、直近ではアプリケーション毎の作り込みや設計指針の確立の優先度が高いと提言している。

上記を踏まえ、工業分野の中でも日本が得意とする金型や窯業などへ、今後付加製造技術の適用拡大を見据えていくと、高温環境における付加製造部材の性能評価、最適構造を用いた熱的特性の制御技術の開発が必要だと考えられる。また、一点ものや複雑な形状が多い分野でもあるため、上述の最適構造を付加製造で造形する際の設計変更負荷を低減した最適化計算手法の確立も重要だと考えられる。

そこで、本研究では高性能な最適構造と実用時に設計負荷の少ない最適化計算手法の確立を目指し、ラティス体積分率分布最適化を当該分野へ適用する事を提案した。ラティス体積分率分布最適化は均質化法により材料部材と空孔や冷媒から構成されるユニットセルを設計した後、構造体内部のユニットセルの配置を目標関数に従い最適配置する。

本方式を高温生産プロセスで活用するにあたり、本研究では熱伝導率可変のユニットセルにより構造体内の熱伝導率を最適配置させ、温度分布を任意に制御する手法を提案した。また工業分野での本手法を展開する上では精度や実用性が重要な要素であるため、マイクロからマクロスケールに渡り解析手法の精度と実造形物の能力を一気通貫で評価し、手法の妥当性と実用性を評価した。これらの検討と技術確立を通じ、本研究では高温生産プロセス分野における DfAM 構築への貢献を目指すものとした。以下に検討結果の要約を記す。

熱伝導率制御ラティスユニットセルの開発

先ず RVE 法を用いて熱伝導率制御ラティスユニットセルを設計した。ユニットセルは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 で求めた上で、設計変数と実効熱伝導率の近似式を得た。

次にレーザー焼結式の金属付加製造装置を用いて、設計したユニットセルから構成される試験片を造形し、製作性に問題が無いことを確認した。また、製作した試験片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、解析結果に対しての精度を評価し以下の結論を得た。

- ・本手法で設計されたユニットセルは、解析で算出された重量および熱伝導率に対し、数%~10%程度の精度で実際に造形可能であることが確認された。

- ・ユニットセルの粉抜き穴径および内部空孔が等方性若しくは異方性かの違いにより、体積分率と実効熱伝導率の相関に差異が生じることを、解析および実測の両者で確認した。

- ・また、ユニットセル外径が熱伝導率におよぼす影響については、解析上は確認されなかったものの、実測においては上記の試験片の重量差に伴い顕在化した。今後本手法の精度をさらに高める上では、用いる付加製造手法に適した基準外径を選定する必要があると判断した。

- ・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、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。

ラティス体積分率分布最適化による温度分布設計技術の開発

上記で製作したラティスユニットセルを用いて、構造体内の熱伝導率分布を制御し参照平面の温度分布を制御する最適構造について、ラティス体積分率分布最適化により導出した。また、得られた熱伝導率分布の最適分布結果を元に、3D モデル化を行い、本計算手法の妥当性について評価した。

次に、上記で得られた 3D モデルをフルモデル化した上で、レーザー焼結式の金属付加製造装置を用いて造形し、造形体の内部構造を CT スキャンで評価し製作性を確認した。また、造形体の温度分布を測定し解析結果と比較することで本手法の妥当性を評価し、以下の結論を得た。

- ・ラティス体積分率分布最適化により構造体内部の熱伝導率分布を最適化することで、温度差最大化問題では温度差を 5 倍程度に増加させるとともに、温度分布均一化問題では 30~48% 温度分布を改善させる最適構造が得られた。

- ・温度分布均一化問題において、近似モデルと 3D モデルを用いた解析結果の差異は 5% 程度と良好であった。これにより、ユニットセルの近似式を用いた解析手法および 3D モデル化工程の妥当性が確認された。

- ・上記の 3D モデルを金属付加製造装置により造形し、CT スキャンでの造形体内部を評価したところ、元の 3D モデルデータに対し主要な形状は 0.1~0.2mm 程度の製作誤差で造形出来ていた。また、内部の欠陥分布を測定したところ、99.6% と高い充填率が達成出来ていた。

- ・造形体を用いた温度分布測定の結果、リファレンスの温度分布に対する最適構造の温度分布改善程度としては約 30% であり、解析結果と比較し約 ±5% 程度と高い再現性が確認された。

以上の結果より、本研究で提案した設計手法は、参照面内の温度分布を高精度に制御しつつ、さらに最適構造を付加製造で造形する上での設計変更の負荷を低減可能な最適化手法として、実用性を有していると判断した。

一方で、マイクロからマクロでの一気通貫での精度評価の結果、各工程で解析と実測での誤差もそれぞれ確認されたため、実運用時はそれに対する考慮が必要である。具体的にはユニットセル時点で製作性や空孔形状により 10% 程度の差異があり、最適構造体においても 5% 程度誤差が確認された。

今後の課題

今後、本研究での提案手法の精度と実用性を高めるためには、まずユニットセル時点の精度改善を目指し、ユニットセルの空孔形状や外径が製作性に及ぼす影響を踏まえた最適な寸法選定を進めるとともに、構造体の結晶性などが実効熱伝導率に及ぼす影響についても精査する必要がある。また最適構造体の作成においても、僅かではあるがユニットセル形状のダレ等が確認されているため、この点を踏まえた全般的な設計の修正が必要と考えられる。

また、本手法の用途拡大を見据え、今後は温度分布の制御だけでなく熱変形の最小化との両立についても検討を進めたいと考えている。

謝辞

本論文は、著者が AGC 株式会社に在職中に広島大学大学院工学研究科の北村充教授のご指導のもと行われた研究を纏めたものであり、同教授により賜ったご指導ご鞭撻に深く御礼申し上げます。

また、研究の方針策定から細部に至る全般まで、親身かつ懇切丁寧にご指南頂いた早稲田大学理工学術院基幹理工学部の竹澤晃弘准教授に、心より厚く感謝申し上げます。

本論文の作成にあたっては、広島大学大学院工学研究科輸送・環境システム専攻構造設計研究室の学生の皆様にも多大なるご協力を頂き感謝いたしております。特に研究の初期から中期で伴走してくれた森豊亮太氏に深く感謝の意を表します。

本研究の推進にあたっては、AGC 株式会社社内の多くの同僚および上司の皆様にご支援を頂きました。厚く御礼申し上げます。この3年間半で所属組織の変更が何度かあったため、お世話になった全員のお名前を挙げることは叶いませんが、その中でも特に、2017年のテーマ起案から博士課程進学に至るまで快くご承諾頂いた、井上滋邦常務執行役員に深く感謝申し上げます。また、素材メーカーである AGC 株式会社にとっては飛び地ともいえる 3D プリンタ開発に挑むにあたり、テーマ設定から進め方に至るまで、親身にご指導頂くとともに強く背中を押して頂いた、起案当時の上長および上位上長である、伴信之氏、小西正哲氏、上堀徹氏、並びに現所属部門長の神谷浩樹執行役員に心より感謝いたします。

また、業務の傍らの研究活動にも関わらず、日々温かくサポートして頂いた、筆者の上長である勝呂昭男氏、ユニット内のメンバーである西岡昭治氏、島田侑和氏、多形嘉俊氏に深く感謝申し上げます。また、新たな技術分野に挑むにあたり、多くの有益な議論をして頂いた、船津志郎氏、ならびに、檜木健氏、橋本篤人氏、柳原一貴氏、中野正徳氏にも御礼申し上げます。

最後に、会社業務と研究生活の両立にあたり、慌ただしい日々が続く中、負担をかけ辛い思いをさせてしまう事も多々ありましたが、それでも深く理解し最後まで支えてくれた妻、息子、娘に心より感謝いたします。

2021年7月

参考文献

- 1) I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker: Additive Manufacturing Technologies, Springer-Verlag (2010).
- 2) Oerikon: AM Factsheet (2017).
- 3) Wohlers Associates: Wohlers Report 2019, (2019) 28.
- 4) Wohlers Associates: Wohlers Report 2019, (2019) 25.
- 5) J.Beau: Volkswagen Saves \$160k in Tooling Costs Using Desktop FDM 3D Printers, (2017), <https://3dprintingindustry.com/news/volkswagen-saves-160k-tooling-costs-using-desktop-fdm-3d-printers-116640>, 2021年6月にアクセス.
- 6) The Manufacturer: <https://www.themanufacturer.com/articles/nissan-accelerates-assembly-line-3d-printing-solution/>, 2021年7月にアクセス.
- 7) DAIMLER 社: Spare parts for trucks and buses made in a 3D printer, <https://www.daimler.com/sustainability/corporate-environmental-protection/3d-print.html>, 2021年6月にアクセス.
- 8) 日産自動車株式会社: 日産の新技术を活用した「NIZMO ヘリテージパーツ」を商品化, <https://global.nissannews.com/ja-JP/releases/release-abe1d9572c0dbf098bf54c66e927c947-210315-01-j>. 2021年6月にアクセス.
- 9) GE additive 社: New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles, <https://www.ge.com/additive/stories/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>, 2021年6月にアクセス.
- 10) S. Kim and S.K. Moon: A Part Consolidation Design Method for Additive Manufacturing based on Product Disassembly Complexity, applied sciences, 10, 3, (2020), 1100.
- 11) S. Yang, Y. Tang and Y. F. Zhao: A new part consolidation method to embrace the design freedom of additive manufacturing, Journal of Manufacturing Processes, 20, 3, (2015),444.
- 12) BMW 社: New technology campus for 3D printing goes on stream:<https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0309872EN/new-technology-campus-for-3d-printing-goes-on-stream:-bmw-group-builds-on-additive-manufacturing-with-skills-consolidated-at-single-site?language=en>, 2021年6月にアクセス.
- 13) BASF 社: BASF Acquires 3D Printing Service Provider Sculpteo, <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2019/11/p-19-398.html>, 2021年6月にアクセス.
- 14) CNET Japan: AGC, 自前開発からの脱却--オープンイノベーションを加速する新研究開発棟開設, <https://japan.cnet.com/article/35162702/>, 2021年6月にアクセス.
- 15) 日立金属株式会社: <https://www.hitachi-metals.co.jp/rad/grit.html>, 2021年6月にアクセス.
- 16) 産業総合研究所 加工技術データベース: <http://www.monozukuri.org/mono/db-dmrc/3dprinter/overview/historyhtml>, 2021年6月にアクセス.

- 17) 小玉秀男：“3次元情報の表示法としての立体形状自動作成法”,電子通信学会論文誌, 64, 4, (1981), 237.
- 18) S. Scott Crump and M. Minn: “Apparatus and method for creating three dimensional objects”. US512132.
- 19) 産業総合研究所 加工技術データベース: <http://www.monozukuri.org/mono/db-dmrc/3dprinter/overview/standard.html>, 2021年6月にアクセス.
- 20) ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012), www.astm.org.
- 21) JIS B 9441:2020: 付加製造 (AM) —用語及び基本的概念, (2020).
- 22) AMPOWER: Additive Manufacturing MANAGEMENT SUMMARY, (2021) 5.
- 23) D. Sher: How major automakers use AM for production today, part 5: BMW additive manufacturing, <https://www.3dprintingmedia.network/bmw-additive-manufacturing/>, 2021年7月にアクセス.
- 24) 三菱重工工作機械株式会社: <https://portal.mhi-machinetool.com/product/lamda>, 2021年6月にアクセス
- 25) Desktop Metal: <https://www.desktopmetal.com/products/studio>, 2021年6月にアクセス.
- 26) ExOne: <https://www.exone.com/en-US/3D-printing-systems/metal-3d-printers>, 2021年6月にアクセス.
- 27) M. P. Bendsøe and O. Sigmund: Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications, Springer-Verlag (2003).
- 28) 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.
- 29) 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.
- 30) M. P. Bendsøe and N. Kikuchi: Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, Computer Method Appl M, 71 (1998) 197.
- 31) M. P. Bendsøe and O. Sigmund: Material interpolation schemes in topology optimization, Archive of Applied Mechanics, 69, 9, (1999), 635.
- 32) 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.
- 33) T. Yunlong: A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance, Rapid Prototyping Journal, 22, 3 (2016) 569.
- 34) 山田 崇恭, 正宗 淳, 寺本 央, 長谷部 高広, 黒田 紘敏: 幾何学的特徴量に対する偏微分

方程式系に基づく幾何学的特徴制約付きトポロジー最適化（積層造形における幾何学的特異点を考慮したオーバーハング制約法），日本機械学会論文集，85, 877 (2019) 19.

- 35) M. Leary: Design for Additive Manufacturing, (2020) Elsevier.
- 36) P. Paradel, Z. Zhu, R. Bibb and J. Moultrie: A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design, Journal of Engineering Design, 29,6, (2018) 1.
- 37) ISO / ASTM52910-18: Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org
- 38) America Makes & ANSI Additive Manufacturing Standardization Collaborative (AMSC): Standardization Roadmap for Additive Manufacturing VERSION 1.0, (2017)
- 39) International Special Tooling & Machining Association (ISTMA): ISTMA STATISTICAL YEAR BOOK - EDITION 2019, (2019).
- 40) 経済産業省機械統計: 機械統計（生産動態統計調査），(2020).
- 41) Victrex: <https://www.victrex.com/blog/2019/five-factors-to-consider-when-moulding-peek>, 2021年6月にアクセス.
- 42) 小畑 克洋, 長澤 政幸, 田村 庸, 中道 義弘: ダイカスト金型表面に発生する熱応力亀裂に対する CAE の適用, 日立金属技報, 32, (2016) 30.
- 43) H. Kurtaran, B. Ozcelik and T. Erzurumlu: Warpage optimization of a bus ceiling lamp base using neural network model and genetic algorithm, Journal of Materials Processing Technology, 169 (2005), 314.
- 44) S. Changyu, W. Lixia and L. Qian: Optimization of injection molding process parameters using combination of artificial neural network and genetic algorithm method, Journal of Materials Processing Technology, 183 (2007), 412.
- 45) Y. Gao and X. Wang: Surrogate-based process optimization for reducing warpage in injection molding, Journal of Materials Processing Technology, 209 (2009), 1302.
- 46) 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.
- 47) 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.
- 48) 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.
- 49) 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.
- 50) J. Kang, H. Shangguan, 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.
 - 51) A. Mohamed, S.H. Masood and A. Saifullah: A simulation study of conformal cooling channels in plastic injection molding, *International Journal of Engineering Research*, 2, 5 (2013), 344.
 - 52) S. A. Jahan and H. El-Mounayri: Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding, *Procedia Manufacturing*, 5, (2016), 888.
 - 53) 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.
 - 54) T. Dbouk: A review about the engineering design of optimal heat transfer systems using topology optimization, *Applied Thermal Engineering*, 112, (2017) 841.
 - 55) 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.
 - 56) A. Takezawa, Y. Koizumi and M. Kobashi: High-stiffness and strength porous maraging steel via topology optimization and selective laser melting, *Additive Manufacturing*. 18 (2017) 194.
 - 57) S. Nemat-Nasser and M. Hori: *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*, North-Holland, Amsterdam, 1993.
 - 58) K. Svanberg: the method of moving asymptotes – a new method for structural optimization, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 24, 2 (1987), 359.
 - 59) 高野直樹:均質化法による新しい数値シミュレーション, *日本複合材料学会誌*, 27, 1, (2001), 4.
 - 60) 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.
 - 61) 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.
 - 62) 森豊亮太: 金属積層造形を利用した高効率冷却ラティス構造の最適化と実験検証, 広島大学大学院工学研究科令和元年度修士論文,(2020).
 - 63) 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.
 - 64) Z. Hansin: Analysis of composite materials: a survey, *Journal of Applied Mechanics*, 50, 3 (1983) 481.
 - 65) 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.
- 66) 日鉄テクノロジー株式会社: 温度傾斜法を用いた熱伝導率および界面熱抵抗の測定事例, https://www.nstec.nipponsteel.com/techrepo/zairyo_pdf/AMM-1902.pdf, 2020 年 12 月にアクセス.
- 67) T. Kimura and T. Nakano: Thermal and mechanical properties of commercial-purity aluminum fabricated using selective laser melting, *mechanical transactions*, 58, 5 (2017) 799.
- 68) 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.
- 69) J. A. Slotwinski, E. J. Garboczi and K. M. Hebensreit: Porosity Measurements and Analysis for Metal Additive Manufacturing Process Control, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 119, (2014), 494.
- 70) M. Ghayoor, K. Lee, Y. He, C. Chang, B. K. Paul and S. Pasebani: Selective Laser Melting of 304L Stainless Steel: Role of Volumetric Energy Density on the Microstructure, Texture and Mechanical Properties, *Additive Manufacturing*, 32, (2020), 101011

関連論文

査読付き発表論文

1. A. Ueno, G. Honghu, A. Takezawa, R. Moritoyo and M. Kitamura: Temperature distribution design based on variable lattice density optimization and metal additive manufacturing, *Symmetry*, 13, 7, (2021), 1194.

2. 宇恵野 章, Guo Honghu, 森豊 亮太, 竹澤 晃弘, 北村 充: 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, *精密工学会誌*, 査読中.

国際会議プロシーディングスおよび口頭発表

3. A. Ueno, G. Honghu, R. Moritoyo, A. Takezawa and M. Kitamura: Lattice Density Optimization for Controlling Surface Temperature of Industrial Products, *Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2020*, Nov. 22–26, (2020), On-line, Korea.