

論文の要旨

題目 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)

氏名 宇恵野 章

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

先ず代表体積要素法(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

上記で設計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解析で得られた。

・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。

・上記の造形体を用いた温度分布を測定し、解析では30%の温度分布改善されたのに対し、実測においてもリファレンスに対し温度分布が約30%改善する結果が得られた。

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、ミ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。