

金属粉末の選択的焼結により得られる造形体の 金属構造部材への適用に関する研究

研究報告者 是 澤 宏 之

プロフィール



最終学歴 平成 9 年 3 月

九州工業大学大学院

情報工学研究科

情報システム専攻

博士後期課程 終了

専門分野 生産技術分野

学位 博士（情報工学）

所属団体名 国立大学法人九州工業大学

大学院情報工学研究院

機械情報工学研究系

役職名 助教

今後の抱負

積層造形法にみられる付加工技術は、切削加工の様な除去加工技術では実現不可能であった、形状や機能性を与えることを可能とする比較的新しい技術であります。今後、製品の高機能化や高能率性の観点から、高付加価値な製品を要求されると想定されます。ものづくり分野における製品と生産技術の開発においては、従来技術を更に深化させると同時に、付加工技術を積極的に用いた展開も必要不可欠になると考えられます。しかしながら、新しい技術は、従来技術では想定されなかった問題点も存在するため、新しい考え方や手法が要求されていることも事実であります。よってこれらの問題点等を解決し、付加工技術を中心とした新たなものづくりに貢献するため誠意努力する所存です。

本研究では、付加加工技術である積層造形技術分野の一つである金属光造形法を用いた射出成形金型の造形を対象とする。この造形方法は、切削加工の様な除去加工技術と比較して、多くの利点を有する反面、これを効果的に生かすための設計方法が必要不可欠である。よって本研究では、内部構造の効果的な設計方法の検討を目的する。数値実験を用いて検証した結果、従来の本造形方法の設計方法と比較して、少ない金属粉末量で同等の構造的な強度を得ることが可能となる構造を得ることができ、造形コストと造形時間の低減が期待できることを確認した。

1. はじめに

射出成形法は、工業製品を大量に製造するために効果的な成形法の一つであり、金型を使用してこれを実現する。そのため、金型は成形品の機能性や生産性に大きな影響を与えるとともに、高機能、短納期、低成本を常に要求される。この様な背景から、付加加工技術である積層造形技術の一分野である金属光複合加工法^[1-3]が開発され、金型製造のリードタイム短縮、低成本などに大きな成果を上げている。この加工法の利点は、従来加工法では極めて困難であった形状を実現すると同時に、より洗練された機能^[4-6]を金型に提供可能な点にある。反面、金属粉末材料が非常に高価、従来加工よりも造形時間が長時間、といった解決すべき課題もある。これを解決するには、造形中のレーザー光の照射エネルギー量を変化させ、焼結体の機械的強度(ヤング率)を制御できる機能を利用して、力学的な状態を考慮にいれた適切な内部構造を設計する必要性がある。

本研究では、金属光複合加工法を用いて射出成形金型を製作する場合、適切な内部構造を設計する方法を検討し、数値実験によりこの方法を検証する。

2. 現状の内部構造設計と問題点

図1に示す様に、この造形方法で製作される構造体は、その表面から内部に向かって、メルト層、スキン層およびコア層と呼ばれる3層構造で形成される。

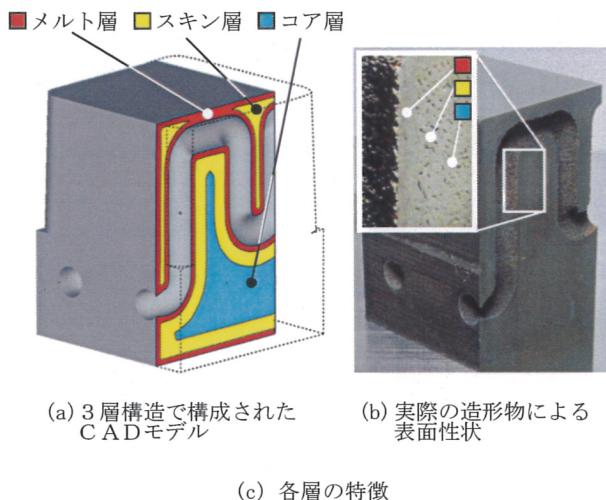


図1 CADモデルと実際の金属粉末焼結モデルの断面および各層の特徴

各層の密度は、メルト層が最大であり、コア層が最小となり、ヤング率の値もそれに対応する。そのため、各層の配置は、構造上、表面からヤング率が、徐々に低下する様に設計される。また、造形時間については、ヤング率が高い程、造形時間は長く、使用する金属粉末量も多く必要とされる。この金属粉末量と造形時間は、造形コストに直接影響を与えるため、適切な使用が求められる。現状の設計において、各層の厚さは、経験的に決定されることから、設計上の根拠性は低く、構造体に作用する外力に起因する力学的な状態を過大あるいは過小なメルト層の使用によって、造形コストの高騰や強度低下の原因になる可能性が高い。よって、構造に作用する力学的な状況を考慮した内部構造の設計が重要となる。なお、本加工法では、適切な焼結体を得られる造形条件は離散的にしか存在しないことが知られていることから、上述の3つの層の造形条件のみを使用するものとする。

3. 力学的状態を考慮した構造体の設計方法

上述した問題を解決するため、構造体の内部を複数の要素に分割し、図2に示す様に、3つの設計プロセスで造形体の内部を設計する。

第1設計プロセスでは、数値解析をベースとした最適化手法を用いて構造体の内部の位相構造をヤング率分布として取得する。ヤング率の高い値を有する要素ほど、構造上の重要度が高いことを意味する。第2設計プロセスでは、前プロセスの結果を用いて、構造体内部の要素において重要度の高い要素から順番に最大のヤング率に置換し、構造的な剛性を効果的に向上させる。第3設計プロセスは、設計の再検討などを実施する。なお、複数の要素に分割された構造体の内部は、数値解析を実行するための要素としても用いる。以下に詳細を述べる。

第1設計プロセス：数値解析に必要な形状や拘束条件などの条件を設定する(A-1)。解析ステップ数(n)を初期化する(A-2)。数値解析を実行し、構造内部の応力を得る(A-3)。この応力を用いて、構造体内部の全要素について、後述するヤング率の更新を実施する(A-4)。更新前と更新後において、ヤング率の変化が認められない場合、収束したとみなし、この時の構造を初期最適化構造と定義する(A-5)。収束した場合は、A(第2設計プロセス)に移動する。解析ステップが、設定した最大繰戻し数を超えた

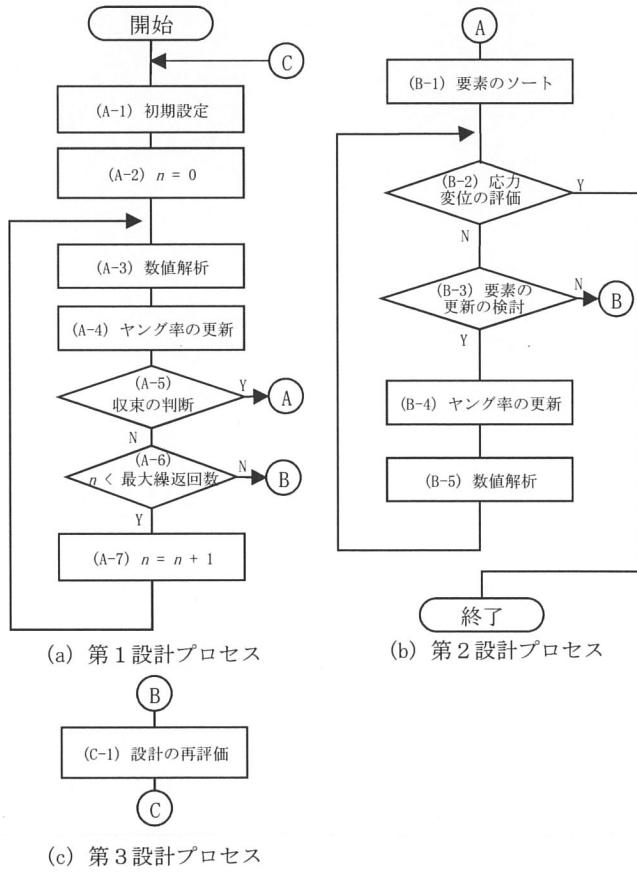


図2 設計手順

場合は、B(第3設計プロセス)に移動する。解析ステップ数に1を加算する(A-7)。(A-3)に戻る。

第2設計プロセス：構造体を構成する全ての要素に対して、そのヤング率を基準として降順に並べ替え、重要度の高い要素を決定する(B-1)。構造体の変形が、設計仕様の変位量以下あるいは焼結体に作用する応力が許容応力値以下であるかを判断する(B-2)。これらを満足した場合は、設計を終了する。この時の構造を修正最適化構造と定義する。そうでない場合、構造体の内部に、置換可能な要素の有無を確認する(B-3)。置換可能な要素のない場合は、B(第3設計プロセス)に移動する。置換可能な要素がある場合は、重要度の高い要素から強制的に、ある一定量の要素数を最大のヤング率に置換する(B-4)。この際、置換されなかった要素は、最低のヤング率に置換する。なお、本報では問題を簡単にするため、メルト層とコア層のヤング率のみを使用する。構造内のヤング率分布が更新されたため、数値解析を実行する(B-5)。(B-2)に戻る。

第3設計プロセス：第1および第2設計プロセスにおける収束条件が満足できなかった原因を考慮し、再設計などを実施する(C-1)。その後、C(第1設計プロセス)に移動し、同様に処理を繰り返す。

4. 数値実験

4-1 実験モデル

図3に、数値実験で用いたモデルを示す。射出成形金型の可動側に取付ける直方体形状の入子を想定する。本モデルの上面(ABCD)に、成形圧力が外力して面直方向から均一に作用すると仮定する。拘束条件などを表1に示す。また、メルト層をコア層のヤング率と最大許容応力を表2に示す。なお、本モデルは、一辺2.5mmの直方体の要素で均一に分割されており、これに対して数値解析を実行する。金型には冷却管などの構造上必要となる形状があるため、本モデル内部に意図的に空間(35x35x10[mm])を配置する。

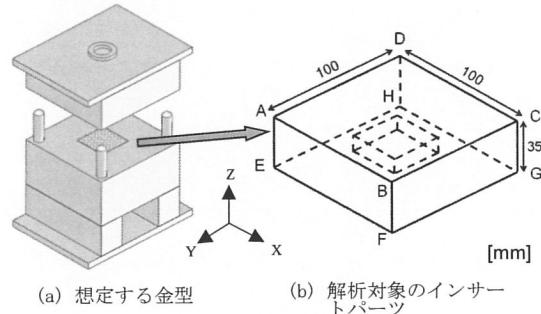


図3 数値実験モデル

表1 境界条件

成形圧力 (P)	9.9 [MPa] A-B-C-D
拘束条件 : Z方向	E-F-G-H
X方向	A-E-H-D, B-F-G-C
Y方向	A-E-F-B, D-H-G-C

表2 許容応力とヤング率

焼結体の状態	許容応力 [MPa]	ヤング率 [GPa]
高密度焼結体 (メルト層)	45	150
低密度焼結体 (コア層)	16	10

4-2 援用した最適化手法

本研究では、ローカルルールに基づく最適化手法^[7]を用いる。このルールを式(1)に定義し、これを各要素に与える。この手法では、数値解析で得られる応力値と目標応力値を用いて、ヤング率を更新する。この更新の結果、構造体の内部の位相構造をヤング率分布として取得する。

$$E^{n+1} = E^n \cdot f(\sigma^n, \sigma_c) \quad (1)$$

ここで、 σ_c 、 σ および E は、それぞれ目標応力、解析によって得られる応力値およびヤング率を示す。 n は解析ステップ数を表す添字である。なお、本報では、 σ に、最大主応力を用いる。

また、ヤング率と目標応力との関係は、以下の関係式を用いる。

$$\sigma = 0.3 \times 10^{-3} E \quad (2)$$

なお、構造の表面は、成形圧力などが作用すると同時に、形状保持の観点から、表面部分の層については、従来の設計と同様に、メルト層のみで構成し、ローカルルールによる更新を適用しない要素とする。解析開始($n=0$)の内部構造には、最大のヤング率(メルト層)を初期値として与える。更新の結果、最大のヤング率を超える要素が発生した場合は、その要素の値については、最大のヤング率に強制的に再設定する。

5. 実験結果および考察

5-1 初期最適化構造の取得(第1設計プロセス)

図4に最適化処理により得られた初期最適化構造の内部のヤング率の分布を等価面で示す。大変複雑な3次元状の面が層状に内部で構成されていることが観察される。なお図中、表面層は全てメルト層で構成されたため、その領域は不可視として表示している。収束状況として、図5に、解析ステップ数毎の構造内部のヤング率の度数分布を示す。解析ステップ数 $n=100$ 以降では、大きな変化が観察されず、本処理の収束を判断し、初期最適化構造が得られたとする。

5-2 修正最適化構造の取得(第2設計プロセス)

図6に、初期最適化構造の内部に発生する応力の度数分布を示す。メルト層の最大許容応力(45[MPa])を

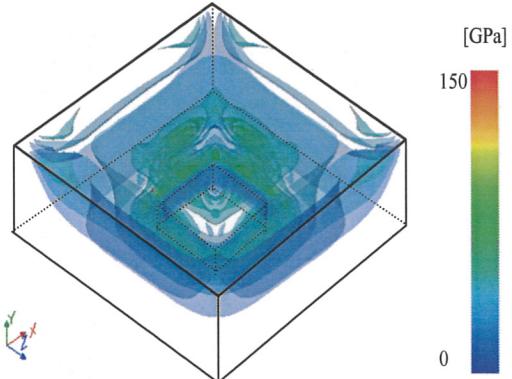


図4 初期最適化構造におけるヤング率分布

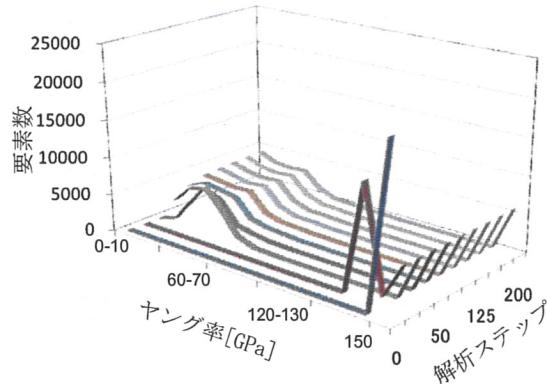


図5 解析ステップ毎におけるヤング率の度数分布の推移

超える要素の存在が確認される。よって、前プロセスの結果を用いて、重要度の高い要素から順番に、最大のヤング率に置換する。10,400 要素が最大ヤング率に置換された初期最適化構造において、構造体の内部の応力が許容応力以下となり、修正最適化構造が得られた。

図7に、修正最適化構造のメルト層とコア層の分布を示す。2の層が非常に複雑かつ立体的に内部構造を構成していることを確認できる。図7(c)に、初期最適化構造と修正最適化構造の各構造の断面のヤング率分布を示す。構造上必要と考えられる部分にメルト層が、効果的に配置されていることを確認できる。

5-3 従来構造と修正最適化構造の比較

図8に、成形圧力が作用する上面部分の変位(Z方向変位)分布を示す。従来構造と比較して、修正最適化構造では、上面の最大変形量を低減すると同時に、より均一な変形を実現したことを確認した。

図9に、各構造の全体積に占めるメルト層の体積比率と成形圧力の作用面の最大変位量の変化を示す。図中、破線が従来構造、実線が初期最適化構造を順次最大のヤング率に置換した構造である。各線の点近傍の数値については、前者はメルト層の厚さを、後者は最大のヤング率に置換した要素数を示す。なお本報では、従来構造においても、構造内部の層は、メルト層とコア層の2層のみとする。

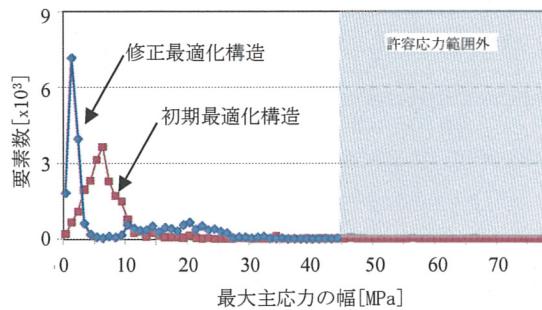


図6 初期最適化構造と修正最適化構造における要素に作用する応力値の度数分布

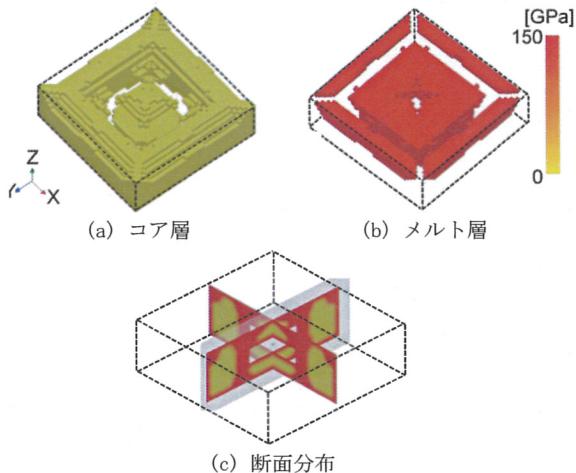


図7 修正最適化構造におけるメルト層とコア層の分布

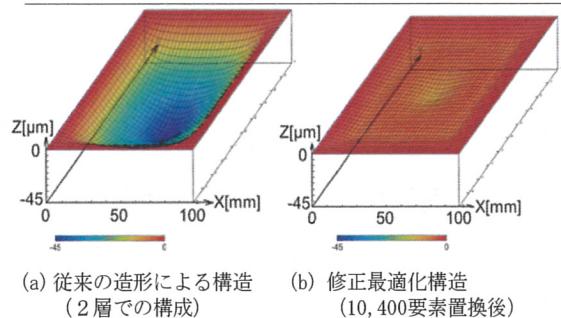


図8 成形圧力作用面のZ方向変形状態

各構造とともに、メルト層の体積比率が上昇するに従い、上面の最大変位量は低減し、構造的な剛性向上が確認される。

修正最適化構造は、同一のメルト層の体積比率(48%)をもつ従来構造を比較して、最大変位量を約 $34 \mu\text{m}$ 低減した。同様に、修正最適化構造と同程度の最大変位量となる従来構造は、修正最適化構造の約 1.6 倍程度のメルト層が必要である。適切な内部構造の設計によって、構造的な剛性の向上および使用する金属粉末量の低減を可能とした。これより、造形時間の短縮と造形コストの低減も期待できる。

6. おわりに

金属粉末にレーザー光を選択的に照射し3次元形状を造形する金属光複合加工法の利用を前提として、これによって製作される金型の内部構造の設計方法について検討した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 最適化手法を援用し、構造内部の位相構造をヤング率分布として取得し、これを用いて設計仕様や許容応力を満足する構造を得る手法を提示し、その有用性を確認した。
- (2) 本手法によって得られた構造体は、従来方法で設計された構造体と比較して、メルト層の占める体積の低減あるいは構造的な剛性の向上を可能とした。これにより、造形時間及び造形コストの低減を期待できる。

参考文献

- 1) 阿部諭他、金属光造形複合加工法の開発—金属光造形法と切削仕上げのオンマシン複合化—、精密工学会誌, 73, 8, pp. 912–916, 2007.
- 2) A. Yassin, et al, Experimental investigation on cutting mechanism of laser sintered material using ball end mill, J. of Material Processing Technology, 209, pp. 5680–5689, 2009.
- 3) T. Furumoto, et al, Study on Laser Consolidation of Metal Powder with Yb : fiber laser – Temperature Measurement of Laser Irradiation Area -, J. of Laser Micro/Nanoengineering, 4, 1, pp. 22–27, 2009.
- 4) T. Yoneyama, et al, Fabrication of Cooling Channels in the Injection Molding by Laser Metal Sintering, Int. J. of Automation Technology 2, 3, pp. 162–167, 2008.
- 5) M. Kojima, et al, Permeability Characteristics and Applications of Plastic Injection Molding Fabricated by Metal Laser Sintering Combined with High Speed Milling,” Int. J. of Automation Technology, 2, 3, pp. 175–181, 2008.
- 6) 米山猛他、金属光造形金型による薄肉低圧射出成形、精密工学会誌, 76, 2, pp. 188–192, 2010.
- 7) 伊能教夫他、力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動、機論 (A), 61, 586, pp. 1416–1422, 1995

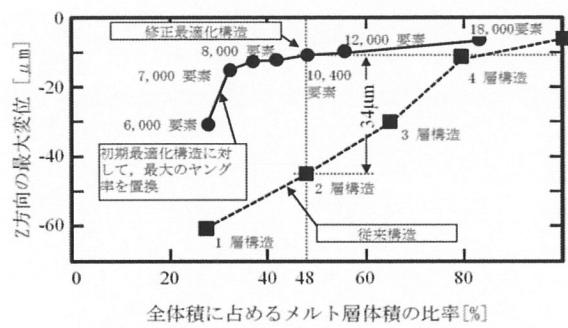


図9 従来構造における表面からのメルト層の層数を変化させた場合、初期最適化構造を要素置換した場合、および修正最適化構造について、Z 方向の最大変位量および構造内部のメルト層の体積比率の変化