慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	溶融金属流動の粒子法解析に基づく指向性ポーラス堆積法の開発
Sub Title	Development of direct deposition for porous structure based on molten-metal dynamics analysis with particle method
Author	小池, 綾(Koike, Ryō)
Publisher	
Publication year	2019
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2018.)
JaLC DOI	
Abstract	金属材料に適用可能な3Dプリンタの一方式として指向性エネルギ堆積法 (DED) が利用される．DEDはレーザなどにより母材に形成したメルトプールへ向けて材料粉末を供給することで積層を繰り返すプロセスだが，微細形状の造形が困難であり，機能性構造の作製にDEDを応用する例は少ない．本研究は，DEDにおいて軽量，高比剛性，振動減衰性に優れるポーラス金属を造形することを目指し，溶融中の材料に水素化チタンを発泡剤として添加する新プロセスを提案した．提案手法はステンレス鋼などのポーラス化が困難な材料であっても50%以上の低密度化に成功するなど，有用な成果を得た． Directed energy deposition (DED) is known as an additive manufacturing process applicable to metals. DED is a process to fabricate a part by irradiating laser beam to form molten pool on a baseplate and supplying material powder at the same time, and hardly used for functional structure fabrication because of its low shape accuracy. In this study, a novel process applying titanium hydride is proposed to fabricate a foam metal which is a light-weight, high-strength and high-damping material. The experimental results show that the proposed method can produce foam metal with high porosity ratio more than 50% even when a stainless alloy is used which is difficult to foam.
Notes	研究種目：若手研究(B) 研究期間：2017～2018 課題番号：17K14574 研究分野：生産工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_17K14574seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 ５ 月 ２９ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2017～2018
課題番号：１７Ｋ１４５７４

研究課題名（和文）溶融金属流動の粒子法解析に基づく指向性ポーラス堆積法の開発

研究課題名（英文）Development of direct deposition for porous structure based on molten-metal dynamics analysis with particle method

研究代表者
小池　綾（Koike, Ryo）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・助教

研究者番号：７０７８１４１７

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,300,000円

研究成果の概要（和文）：金属材料に適用可能な3Dプリンタの一方式として指向性エネルギ堆積法（DED）が利用される．DEDはレーザなどにより母材に形成したメルトプールへ向けて材料粉末を供給することで積層を繰り返すプロセスだが，微細形状の造形が困難であり，機能性構造の作製にDEDを応用する例は少ない．本研究は，DEDにおいて軽量，高比剛性，振動減衰性に優れるポーラス金属を造形することを目指し，溶融中の材料に水素化チタンを発泡剤として添加する新プロセスを提案した．提案手法はステンレス鋼などのポーラス化が困難な材料であっても50%以上の低密度化に成功するなど，有用な成果を得た．

研究成果の学術的意義や社会的意義
内部に多孔質構造を持つポーラス金属は，軽量性，高比剛性，振動減衰性，断熱性，防音性に優れる，非常に有用な材料と認められながらも，従来製造法は多くの時間とコストを求めるものであり，実用されることは少なかった．一方で，本研究の提案手法は実用されている金属3Dプリンタの材料に発泡剤を混ぜるだけで実行でき，自由な形状を作製できるため様々な機械部品に対してポーラス金属を容易に利用できるようになる．これにより，先に示した様々な機能性をあらゆる機械に付与することができる点で非常に意義がある．

研究成果の概要（英文）：Directed energy deposition (DED) is known as an additive manufacturing process applicable to metals. DED is a process to fabricate a part by irradiating laser beam to form molten pool on a baseplate and supplying material powder at the same time, and hardly used for functional structure fabrication because of its low shape accuracy. In this study, a novel process applying titanium hydride is proposed to fabricate a foam metal which is a light-weight, high-strength and high-damping material. The experimental results show that the proposed method can produce foam metal with high porosity ratio more than 50% even when a stainless alloy is used which is difficult to foam.

研究分野：生産工学

キーワード：指向性エネルギ堆積法　ポーラス金属　水素化チタン　ステンレス鋼　3Dプリンタ　溶湯発泡法

１．研究開始当初の背景

(1)　新世代のものづくりのあり方が世界的に議論されており,その中でも情報技術を活かしたマスカスタマイズ生産への発展が重要な課題とされている．こうした多品種生産に対して柔軟に対応できる 3D プリンタ技術が注目を集めており,ものづくり産業への適用事例が急速に増えている．特に金属材料に対応可能な 3D プリンタは多様な産業から注目されており，その一方式である指向性エネルギ堆積法は，高出力熱源を利用でき造形効率が高いことから，大型で複雑形状の部品を必要とする航空・自動車産業を中心に導入が進められている．

(2) 指向性エネルギ堆積法は，粉末やワイヤ状となった材料を供給すると同時にレーザなどによって母材ごと加熱することで，材料を連続的に凝着させるプロセスである．同じく金属材料に適用可能なパウダーベッド方式などと比較して，厳密な密閉機構が不要な点で大型部品の造形に適している一方で，微細加工に向かず，ラティス構造のような多くの 3D プリンタが得意とする機能性構造の作製が困難である．機能性材料の作製という観点では，指向性エネルギ堆積法における材料粉末の配合比を徐々に変更することで傾斜機能材料を造形する提案はあるが,構造そのものを変える提案は未だ少ない．指向性エネルギ堆積法の実用性を高めるためには,造形物の構造をデザインできる応用技術の開発が強く求められている．

２．研究の目的

(1) 本研究は，指向性エネルギ堆積法の応用プロセスとしてポーラス金属造形法の開発を目指した．ポーラス金属は多孔質構造をもつ金属材料であり，軽量性，振動吸収性，断熱性，高比剛性，防音性，電磁遮蔽性など，様々な優れた機能性をもっている．こうした機能性の高さはよく知られているものの，ポーラス金属の従来製造法は煩雑で高コストであるために，未だ実用製品に使用されることが少ない．本研究では従来製造法の一つである溶湯発泡法を参考に,水素化チタンを材料粉末に混合することでメルトプールを発泡させるポーラス金属造形法を提案する．水素化チタンは 500℃以上の環境下で熱分解して水素を発生する材料であり，溶湯のような高温の液体を発泡させる目的に適している．

(2) 金属 3D プリンタに関する多くの研究は,造形物の密度をいかに高めるかに焦点を当てているが，その逆の発想として，いかに内部空隙を増やせるかに焦点を当てたことが本研究は独創的な点といえる．本研究では，水素化チタンを発泡剤として用いた場合，指向性エネルギ堆積法における造形物の空孔率をどこまで高められるかを明らかにすることを目的とする．

３．研究の方法

(1) 発泡剤を混合した粉末材料で造型したステンレス鋼について，多様な造形条件下で作製したサンプルをアブレイシブウォータージェットカッター機で切断し，断面観察を行うことで,空孔発生の様子を評価する.さらに,撮影した断面画像を二値化することで空孔領域を判別し,断面領域との面積を比較することで空孔率を算出する．

(2) 上記と同じく，空孔率を評価する上で X 線 CT スキャンも合わせて使用し，立体的に構造を評価する．また，得られたボクセルデータから密度を計算し，先に断面画像から算出した空孔率と比較して，断面画像観察の妥当性も評価する．

(3) 指向性エネルギ堆積法において水素化チタンを発泡剤として加えるほか，増粘剤としてカルシウム酸化物，界面活性剤としてテルルを加えるなど，空孔率をより高める材料の添加を行い，それらの効果を確認する．

(4) 固気混相シミュレーションにより，メルトプールの発泡状態を解析する．特に空孔の分布やサイズを制御するための支配的なパラメータを明らかにすることを目指す．

４．研究成果

(1) 単層積層試験において，ステンレス鋼粉末に水素化チタンを 2 wt% 添加しても造形物に大きな変化を確認することはできなかった．しかしながら，水素化チタンを 10 wt% 添加した場合,造形物断面には直径 100μm 以上の比較的大きな空孔が数個発生していることが確認できた．

(2) 単層試験の結果から，発泡剤によって発生する空孔サイズは 1 層あたりの高さ(0.5 mm)と同等の大きさであったことから，発生した水素の多くはメルトプールから逃げてしまったと考えられる．そこで 6 層積層試験を行い，造形物内部に残る空孔の様子を観察することにした．

　図 1 に示すとおり，6 層造形物内部には多くの空隙があり，空孔率が 49%に達するほど低密度な造形物を作製できることがわかった．また 1 層あたりの高さを超えるサイズの空孔も多く確認でき，当初想定していたポーラス層を一層ずつ積層するといったプロセスでは対応できないメカニズムで空孔が発生していることがわかった．

図 1 左：造形物外観　右：造形物断面（空孔率 49%）

(3) より空孔率を高めるための工夫として，メルトプールの粘性を高めて表面張力を下げることで空孔の崩壊を防ぐべきである．したがって，増粘剤としてカルシウム酸化物，界面活性剤としてテルルを材料粉末に添加した．それぞれの添加量に対する空孔率の変化は図 2，3 に示すとおりである．レーザ出力が高まるほど空孔率が高まる傾向があるほか，増粘剤の添加には大きな変化を確認できなかった．これは，鉄基合金であるステンレス鋼の溶融状態ではもとから粘性が高く，増粘剤による変化がほとんどなかったためと考えられる．一方で，界面活性剤は造形物表面の臨界膜厚さを低減させ，図 4 のように空孔の崩壊を防ぐ様子を確認できた．この効果により，最大空孔率 61%を達成した．

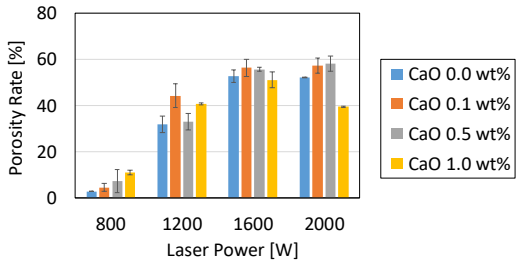

図 2 増粘剤（カルシウム酸化物）の添加量による造形物内部の空孔率の差異

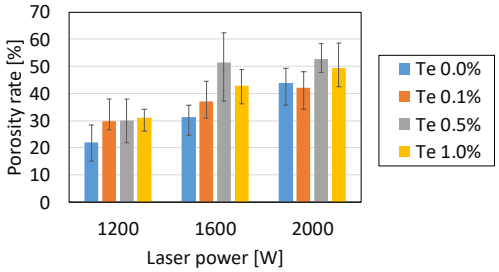

図 3 界面活性剤（テルル）の添加量による造形物内部の空孔率の差異

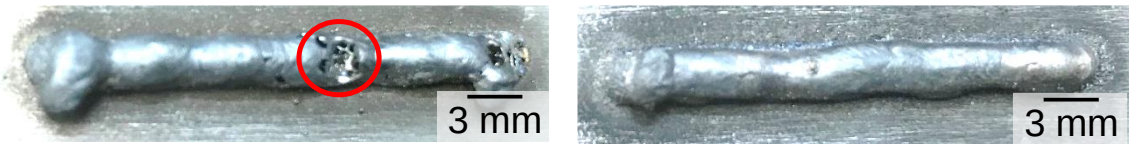

図 4 左：テルル無添加の造形物表面　右：テルル 1 wt%添加の造形物表面

(4) 造形物内部にはまだ熱分解されていない水素化チタンが混在しており，レーザの再照射によりさらに発泡させることができることを発見した．これによりポーラス金属の板材を作製するプロセスとして,造形した板材の側面に再溶融処理を施すことが有用であることがわかった．

(5) 固気混相シミュレーションについては，想定よりもはるかに大きな空孔が発生しており，空孔の崩壊の様子を再現することが困難であった．特に表面張力を考慮した臨界膜厚さの表現が時間領域シミュレーションで再現できず，空孔率を上げるための支配的パラメータを突き止めるに至っていない．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　２件）

① Ryo Koike, Taro Misawa, Tojiro Aoyama, Masaki Kondo, “Controlling metal structure with remelting process in direct energy deposition of Inconel 625”, CIRP Annals Manufacturing Technology, 査読有, Vol.67, No.1, 2018, 237-240.

② Ryo Koike, Taro Misawa, Yasuhiro Kakinuma, Yohei Oda, “Basic study on remelting process to enhance density of Inconel 625 in directed energy deposition”, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.12, No.3, 2018, 424-433.

〔学会発表〕（計　４件）

① 松本昂士，柿沼康弘，小池綾，近藤昌樹，溶湯発泡法を応用した粉末溶融積層法によるポーラス金属造形，第 12 回生産加工・工作機械部門講演会，姫路，2018.

② Ryo Koike, Taro Misawa, Tojiro Aoyama, Masaki Kondo, “Stainless foam fabrication by containing titanium hydride into direct energy deposition”, CIRP General Assembly 2018, Tokyo, Japan, 2018.

③ Ryo Koike, Takashi Matsumoto, Yasuhiro Kakinuma, Tojiro Aoyama, Yohei Oda, Tatsuhiko Kuriya, Masaki Kondo, “A basic study on metal foam fabrication with titanium hydride in direct energy deposition”, 18th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry, Garbsen, Germany, 2018.
④ 松本昂士，柿沼康弘，小池綾，レーザ再溶融を用いた金属粉末積層造形法における残留空孔分布および結晶方位制御，2018 年度精密工学会春季大会，東京，2018.

〔図書〕（計　0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計　0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計　0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織

(1)研究分担者
研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号（8 桁）：

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。