

## 蒸気タービン・ガスタービン材料への 金属3次元積層造形技術の適用

Application of Metal Additive Manufacturing Method to Steam and Gas Turbine Materials

日野 武久 HINO Takehisa 大西 春樹 OHNISHI Haruki 只野 智史 TADANO Satoshi

金属3次元(3D)積層造形技術は、熱源として電子ビーム又はレーザービームを用いて、金属粉末の溶融・凝固を繰り返して金属部品を製作することができ、金型を必要とせず短時間で成形できる利点から幅広い分野に適用されつつある。一体製造で部品点数を削減できる点や、複雑な形状が可能となり設計の自由度が増す点などから、発電プラントなどインフラ機器への適用も検討されている。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、金属3D積層造形技術を、蒸気タービンやガスタービンなどのエネルギー機器に適用するための技術開発を進めている。タービン翼に使用される高温材料について、原料粉末や造形パラメーターなどを最適化した結果、試作材料で良好な組織と機械的特性が得られることを確認した。また、造形時の変形を抑制するためのサポート部品の設計に最適なシミュレーション手法も開発した。

Metal additive manufacturing (AM) is attracting attention as a technology that makes it possible to produce metal parts in a short period of time without die making through a process of repeated melting and solidification of metal powders using an electron or laser beam as a heat source. This technology has begun to be applied to various fields. The need has also arisen in recent years for reductions in the number of parts in industrial equipment, such as components for power generation plants, through the use of integrally molded parts, and for increased design flexibility through the ability to manufacture parts having complicated shapes.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation is engaged in the development of metal AM technologies for application to equipment for thermal power plants, including steam and gas turbines. We have selected a powder bed fusion method for this purpose due to its high shaping speed and accuracy. As a result of the optimization of raw metal powders and process parameters for high-temperature materials to be used in turbine blades, we have confirmed the fine metallurgical structure and good mechanical characteristics of such materials through mockups. We have also developed a simulation method that allows optimal support structures to be designed in order to suppress deformation in metal AM processes.

### 1. まえがき

金属3D積層造形は、電子ビーム又はレーザービームを利用し、必要な部分の金属粉末を溶融・凝固させて金属部品を製作する技術である。金型を製造することなく複雑な形状の部品を短時間で成形できるため、航空宇宙や、自動車、医療などの幅広い分野で適用されつつあり、発電プラントなどのインフラ機器への適用も検討されてきている。

しかし、発電プラントは製品寿命が長く、部材には長期間の高い信頼性が求められるため、金属3D積層造形材の材料特性データの蓄積量は、現状では必ずしも十分とは言えない。また、金属3D積層造形は、溶融・凝固の繰り返しプロセスによるため、製品に変形が生じやすく、残留ひずみも発生しやすい。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、蒸気タービンやガスタービンなどに使用される材料について、造形・熱処理技術の開発や、金属の組織及び強度データの蓄積を図ると

もに、変形解析や変形抑制方法についての技術開発を進めている。ここでは、これらについて、これまでに得られた技術成果を述べる。

### 2. 金属3D積層造形手法の選択

金属3D積層造形手法にはパウダーベッド方式とデポジション方式がある(図1)。パウダーベッド方式は、原料粉末を厚さ数十 $\mu\text{m}$ で敷き詰め、造形したい部分に電子ビームやレーザービームなどの高エネルギービームを照射するという工程を繰り返して積層することで、造形物を得る方式である。デポジション方式は、電子ビームやレーザービームなどの高エネルギービームの照射位置に粉末やワイヤなどの造形材料を供給して積層し、造形物を得る方式である。

一般に、デポジション方式に対しパウダーベッド方式は、造形速度が劣るものの造形精度は高いという特徴がある。また、高エネルギービームの中で、電子ビーム式は、①高密度で強度の高い造形材が得やすい、②酸化などの影響

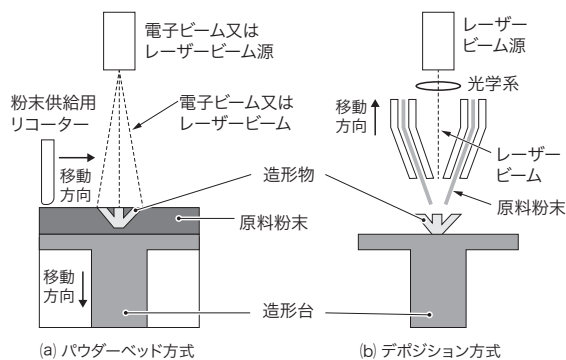


図1. 金属3D積層造形手法

造形精度と造形速度の点から、パウダーベッド方式の電子ビーム積層造形装置を採用した。

Methods for metal AM

が少ない、③高速走査が可能、などの特長を有している。

そこで、今回は造形精度と造形速度の点から、パウダーベッド方式の電子ビーム積層造形装置を選択した。

### 3. 金属3D積層造形材の特性

ここでは、開発している材料のうち、蒸気タービン翼材として使用される鉄合金（12クロム（Cr）鋼）とガスタービン翼材などに使用されるコバルト合金（Mar-M509相当材）の造形結果を述べる<sup>(1), (2)</sup>。

図2は、12Cr鋼の原料粉末と、その粉末による造形材の断面組織である。一般に、金属3D積層造形に使用される原料粉末は、金属溶湯（液体状の金属）に不活性ガスを吹き付けて粉末を作製する、ガスアトマイズ（ガス噴霧）法によるものを使用することが多い。図2には、アトマイズガス（吹き付けガス）にアルゴンガスを用いたものと窒素ガスを用いたものの2種類の粉末を示した。12Cr鋼の場合、アルゴンガスを用いて製造した粉末は、窒素ガスを用いて製造した粉末と比較し、粉末内部に気孔が多く残存することが明らかとなった。

12Cr鋼は、窒素と親和性の高いCrなどの元素を多く含んでおり、窒素ガスアトマイズ粉末では、それらの元素が窒素と反応することでガスが材料内部に取り込まれ、気孔が少なくなったと推測される。これに対し、アルゴンガスアトマイズ粉末を用いて製作した金属3D積層造形材には、造形後も気孔が残存していた。

図3にアルゴンガスアトマイズ粉末と、窒素ガスアトマイズ粉末、鍛造材のクリープ試験結果を示す。アルゴンガスアトマイズ粉末に対し、窒素ガスアトマイズ粉末は、鍛造材並みの優れたクリープ特性を示した。これは、窒素ガスアトマイズ粉末の気孔が少ないためと、窒素ガスが12Cr鋼の

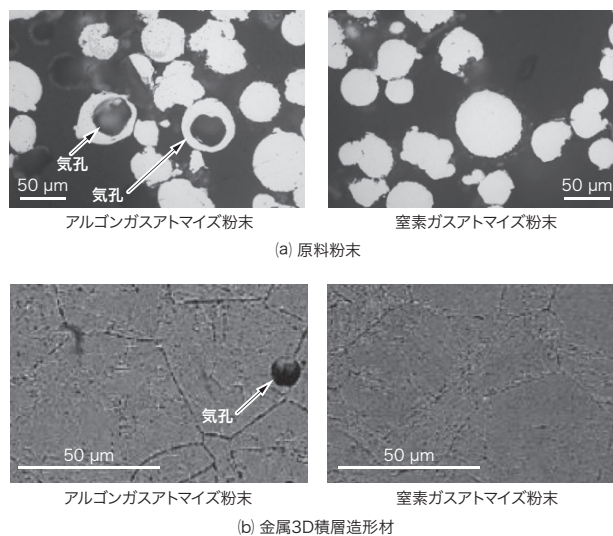
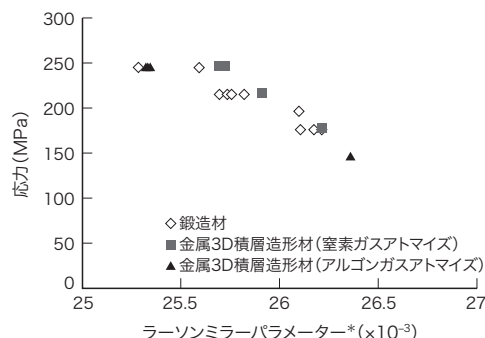


図2. ガスアトマイズ粉末と、その粉末で造形した金属3D積層造形材の断面写真

窒素ガスアトマイズ粉末では、気孔のない良好な金属3D積層造形材が製作できることが明らかとなった。

Cross-sectional micrographs of gas-atomized powders and metal AM materials



\*温度と時間を一元的にまとめた値。長時間のクリープ破断試験を短時間の試験で代用できる。

図3. 金属3D積層造形材（12Cr鋼）のクリープ特性

金属3D積層造形材は、鍛造材並みの優れたクリープ特性を示した。

Creep characteristics of metal AM materials (12% chromium (Cr) steel)

強度向上に有効な微細な炭窒化物形成に寄与したためと考えている。また、0.2%耐力や、引っ張り強度、伸び、絞りなどの機械的特性についても試験を行い、鍛造材と同様の特性であることを確認した（図4）。

次に、ガスタービン翼材に使用されるコバルト合金の造形結果について述べる。

コバルト合金では、生体材料であるコバルトクロム合金（ASTM-F75）による造形例は多いが、ガスタービン材料として用いられている材料での造形例は少ない。そこで、ガスタービン静翼材として用いられるMar-M509と同様な組成

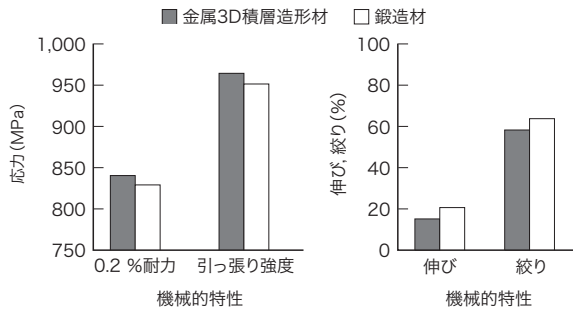


図4. 鍛造材と金属3D積層造形材(12Cr鋼)の室温における引っ張り特性の比較

鍛造材とほぼ同等の機械的特性が確認できた。

Comparison of tensile characteristics of forged and metal AM materials (12% Cr steel) at room temperature

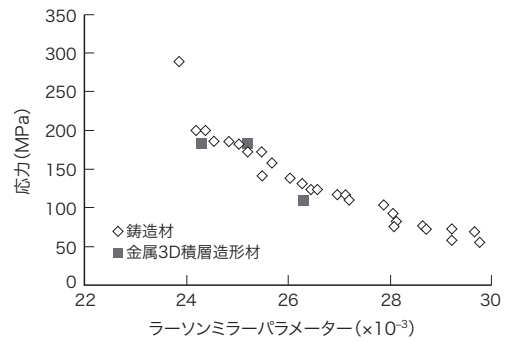
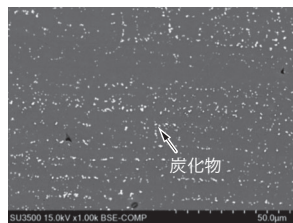


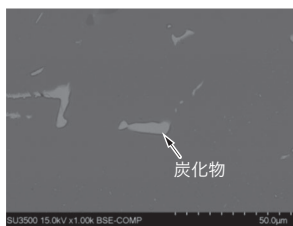
図6. 金属3D積層造形材(Mar-M509)のクリープ特性

ばらつきはあるものの、鍛造材並みのクリープ特性が得られた。

Creep characteristics of metal AM material (Co-based alloy)



(a) 金属3D積層造形材



(b) 鍛造材 10 μm

図5. 鍛造材と金属3D積層造形材(Mar-M509)の断面写真

鍛造材は、数十μmサイズ以上の炭化物が析出しているのに対し、金属3D積層造形材は、数μmサイズで、気孔のない良好な組織が得られた。

Cross-sectional micrographs of cast and metal AM materials (cobalt (Co)-based alloy)

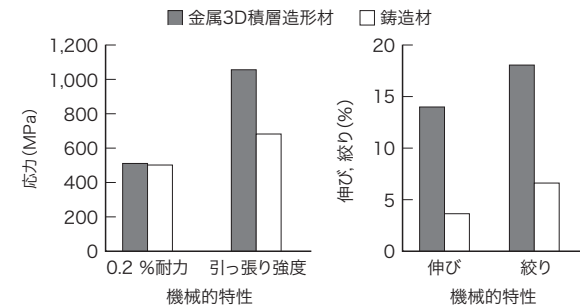


図7. 鍛造材と金属3D積層造形材(Mar-M509)の室温における引っ張り特性の比較

鍛造材と同等以上の引っ張り特性を示した。

Comparison of tensile characteristics of cast and metal AM materials (Co-based alloy)

の粉末を用いて造形材を製作し、特性を評価した<sup>(2)</sup>。

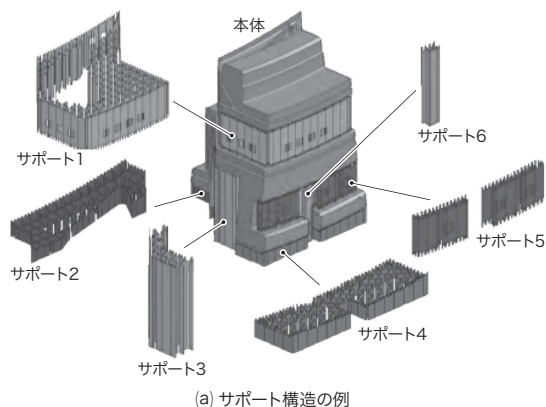
図5に、このコバルト基合金での金属3D積層造形材の金属組織を鍛造材<sup>(3)</sup>と比較したものを示す。鍛造材は、数十μmサイズ以上の炭化物が析出しているのに対し、金属3D積層造形材では、数μmサイズの細かい炭化物が造形方向に沿って析出するなど、合金組織に違いはあるが、気孔などの欠陥は認められなかった。

金属3D積層造形材と鍛造材のクリープ強度を比較したものを図6に示す。ばらつきはあるものの、金属3D積層造形材でも、鍛造材並みのクリープ特性が得られることを確認した。図7に、室温での、金属3D積層造形材の引っ張り特

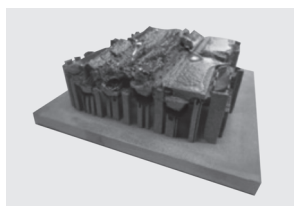
性について、鍛造材との比較を示す。金属3D積層造形材の0.2%耐力及び引っ張り強度は、鍛造材と同等以上の特性を示した。

#### 4. 変形解析によるサポートの設計

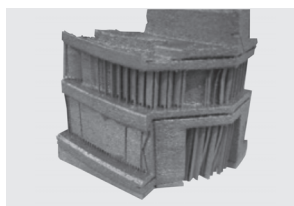
金属3D積層造形は、造形時の熱収縮や凝固ひずみによる変形が生じやすいので、図8(a)に示すように、造形物を保持するためのサポートと呼ばれる部品を一体造形することによって変形を抑制している。変形の抑制には、サポートの量が多いほど有効であるが、最終的には取り外す必要がある部品なので、そのためのコストや時間を考慮すると、過剰に取り付けるのは望ましくない。また、従来、サポートを設計するときは試行錯誤を繰り返すことが多く、手間とコストが掛かっていた。そこで、当社は、シミュレーションによるサポート設計手法を開発している。固有ひずみ法と言われる解析手法を用いれば、造形物の変形量が許容範囲以内で、かつ取り外し除去がしやすいサポートを設計できる。



(a) サポート構造の例



(b) 不適切なサポート構造での造形例

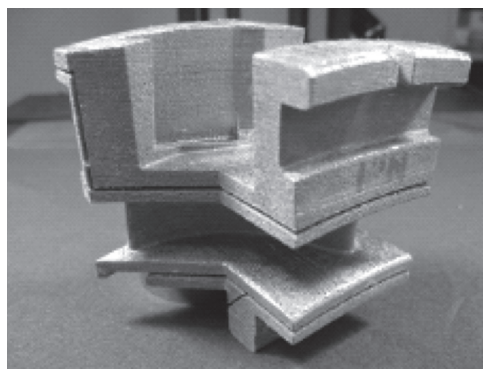


(c) 適切なサポート構造での造形例

**図8. サポート構造を用いた造形例**

サポート構造を最適化することで変形を抑制し、良好な造形を行うことができる。

Examples of support structures using metal AM processes



**図9. 金属3D積層造形による試作部品**

造形条件やサポート構造の最適化により、許容寸法内で機械特性に優れた造形物が製作できた。

Mockup created by metal AM

図8(b)に示すように、サポートの設計が不適切な場合は造形不良になるが、開発したシミュレーション技法を用いることで、最適なサポートが設計でき、良好な造形を行うことが可能となった(図8(c))。

図9に、前述の造形条件やサポート設計手法などを用いて試作した、コバルト基合金による金属3D積層造形物を示す。許容寸法内に収まり、かつ機械特性に優れた造形物

が製作できた。

**5. あとがき**

蒸気タービンやガスタービンなどのエネルギー機器に対する金属3D積層造形技術の適用検討について述べた。この技術は、従来手法では製作不可能だった複雑な形状の部品が製作可能となるため、性能向上を目指した形状の造形が期待できる。また、金型を必要とせずに3D CADデータから直接製作できるため、少量製造品については、高速で低コストなどのメリットもある。今後、更に造形技術や変形シミュレーション技法の改良を重ね、エネルギー機器への適用実現を目指していく。

**謝辞**

この研究で、12Cr鋼については、国立大学法人 東北大学(以下、東北大学と略記)金属材料研究所 千葉研究室との共同研究結果を使用した。この研究を、共に推進していただいた東北大学 金属材料研究所の千葉晶彦教授、小泉雄一郎准教授(現在、国立大学法人 大阪大学教授)、青柳健大助教、紀伊 正研究員に感謝の意を表します。

**文献**

- (1) 大西春樹, ほか, “電子ビーム積層造形で作製した12Cr耐熱鋼の機械的特性”. 日本鉄鋼協会 第174回秋季講演大会論文集, 札幌, 2017-09, 日本鉄鋼協会. 2017, 論文番号322. (CD-ROM).
- (2) 日野武久, ほか, エネルギー機器材料の3次元積層造形技術の開発. 日本ガスタービン学会誌. 2018, 46, 3, p.221-226.
- (3) Brown, W. F. et al. Aero Space Structural Metals Handbook. Volume 5, West Lafayette, Ind. CINDAS/ USAF CRDA Handbook Operation, Purdue University. 1979, Code4311 Co-24Cr-10Ni-7W-3.5Ta+Ti+Zr, p.19.



**日野 武久 HINO Takehisa**  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
エネルギーシステム技術開発センター 材料技術開発部  
日本ガスタービン学会・溶接学会・粉体粉末冶金協会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



**大西 春樹 OHNISHI Haruki**  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
エネルギーシステム技術開発センター 材料技術開発部  
日本鉄鋼協会・溶接学会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



**只野 智史 TADANO Satoshi**  
東芝エネルギーシステムズ(株)  
エネルギーシステム技術開発センター 材料技術開発部  
溶接学会会員  
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.