

# アルゴン雰囲気チャンバを用いた指向性エネルギー堆積法における 高強度・高密度造形

慶應義塾大学理工学部 ○杉浦 悠介, ◎柿沼 康弘, 小池 綾

## 要旨

指向性エネルギー堆積法による金属材料造形が航空産業を中心に利用され始めている。しかし、造形物の内部欠陥や低機械強度など、指向性エネルギー堆積法は信頼性に課題が残っている。本研究ではプロセス中の酸化現象が内部欠陥発生や機械的強度低下に与える影響を評価するため、冷却機構付きアルゴン雰囲気チャンバを作製した。不活性雰囲気を高め造形物の過加熱を防ぐ事で、ブローホール型空孔の発生を抑制できる事を確認した。

## 1. 緒論

近年、材料を付加することでデジタルデータから立体物を直接造形できる Additive Manufacturing (AM) 技術が注目を集めている。AM 技術は従来の加工法では作製が難しい複雑形状物を容易に造形でき、材料によっては高い造形効率を実現できるなどの優位性がある。金属部品を後処理工程無しで最終製品に組み込む要求は、航空宇宙産業を中心に年々増加しており、AM 技術のさらなる応用が期待されている。一方で、AM 技術には Fig. 1 のような造形物の内部欠陥による低密度化、機械的性質の低下などの課題が存在し、実用が妨げられている。これまでに積層パラメータ最適化により内部欠陥の発生を抑制する研究が行われている[1]が、造形空間中の環境要因について評価した例は少ない。そこで本研究では、造形物の高強度・高密度化を目的に、ベースプレートの冷却機構および不活性雰囲気チャンバの作製を行った。

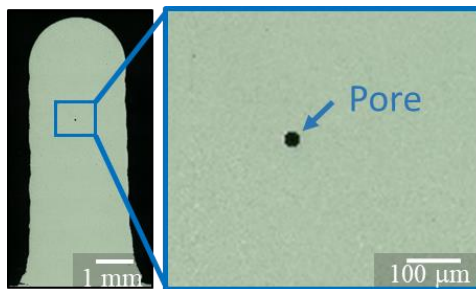


Fig. 1 Pore observed on the cross-section of deposit

## 2. 指向性エネルギー堆積法

本研究では AM 技術の中でも Fig. 2 に示すような金属材料を利用可能な指向性エネルギー堆積法を対象とした。この技術は、金属粉末をレーザー射出部と一体のノズルから供給すると同時に、レーザーにより粉末の熔融・凝固を繰り返すことで積層造形を行う。積層速度が速い、大型製品の造形が可能、造形形状や加工空間の制約が少ないといった利点から、大型の複雑形状部品の製造や補修への活用が期待されている。材料粉末は、切削加工が困難な Ni 基耐熱合金 Inconel 625 を用いた。Inconel 625 は優れた強度と耐食性から、広く海洋機器や航空機部品等に使用されている。

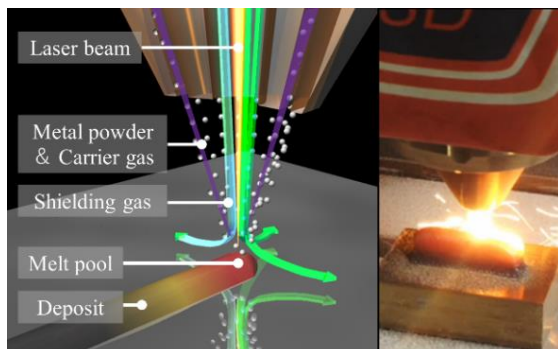


Fig. 2 Directed Energy Deposition

## 3. 実験装置および方法

造形物の酸化や熱だまりを防止し、ブローホールなどの空孔や高温割れを低減するため、Fig. 3 のような積層中の雰囲気を不活性ガスのアルゴンで満たす冷却機構付きチャンバを作製した。本実験では、チャンバ内部で 48 層積層物を造形し、造形時の雰囲気や冷却効果が内部欠陥の発生および造形物内部の金属組織形成に及ぼす影響を評価した。Table. 1 と同様の通常積層条件に加え、空孔率の低減を目的として 3 層造形ごとに最上層にレーザー再溶解[2]を施し、かつ積層状態を監視してレーザー出力をインプロセス制御する応用積層条件も比較・評価した。また、機械的強度の評価として、作製した造形物に対する引張試験および硬さ試験といった材料特性試験を行った。各積層条件における定量的評価は、3 個の造形物から算出した平均として示した。

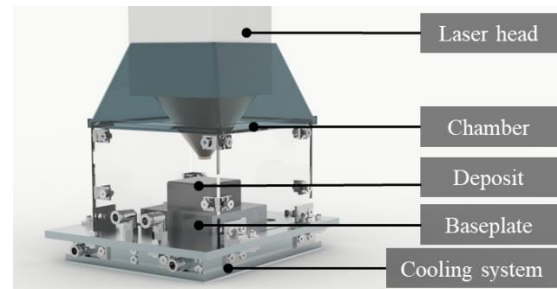


Fig. 3 Argon atmosphere chamber with cooling system

Table. 1 Deposition condition

Parameter	Value
Laser power	W 1600, Modified
Powder feed rate	g/min 18
Carrier gas supply	l/min 6
Shielding gas supply	l/min 4
Feed rate	mm/min 1000
Number of layers	48
Material of powder	Inconel 625
Particle size	μm 45~125

## 4. 実験結果および考察

### 4.1 アルゴン雰囲気チャンバによる内部欠陥低減実験

大気中およびアルゴン雰囲気中で造形した 48 層積層物を Fig. 4 に示す。(a) 大気中で積層した場合、表面は酸化皮膜に覆われ黒色を呈した。一方で (b) アルゴン雰囲気中で積層した場合、表面は金属光沢を帯び、大気中の造形より高く積層された。チャンバを用いて積層雰囲気を不活性ガスで満たすことにより、酸素濃度が減少し表面の酸化が防がれたと考えられる。また、装置に付随する冷却機構により、積層部分の熱が効率よく排出されたため熱垂れが抑制され、より高く積層できたと考えられる。

積層物断面の空孔率はチャンバ内で積層を行った場合、Fig. 5 に示すように大気中と比較して著しく低減された。特にレーザー出力制御も併用した場合は大気中のレーザー出力 1600 W 時と比較して 65 % の低減効果を示し、最小平均空孔率 0.014 % を達成した。

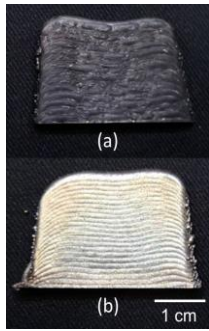


Fig. 4 Deposits produced in  
(a) open air and  
(b) argon chamber

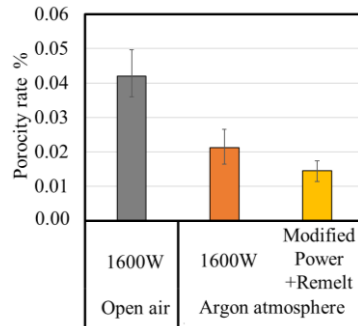


Fig. 5 Porosity rate with and without argon atmosphere chamber

空孔率は造形物断面に占める空孔面積比を表す巨視的な指標であるため、Fig. 6 に例示するような空孔形状の違いを評価するためには微視的な指標が不可欠である。そこで、解析対象の図形輪郭の複雑さを表す指標である円形度を導入し、積層物断面に観察される  $10 \mu\text{m}^2$  以上の空孔について、その輪郭長  $L$  と面積  $S$  から円形度  $C$  を (1) 式のように算出した。円形度が低い空孔ほど応力が集中し、破断の要因となりやすいことを考慮すると、空孔各々のサイズや形状を定量化することで造形物の潜在的なリスクも推定できる。

$$C = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (0 < C < 1) \quad (1)$$

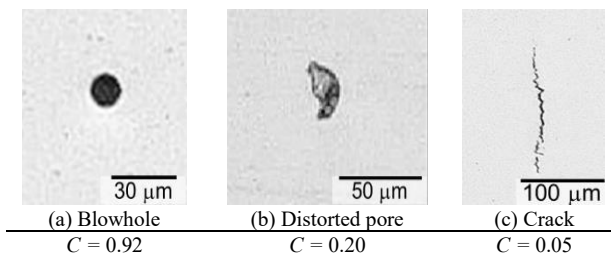


Fig. 6 Variety of pore shapes

大気中でレーザー出力 1600 W とし通常積層する条件、およびアルゴン雰囲気下で応用積層条件により積層した 48 層積層物断面に観察される空孔各々について、面積と円形度を軸に 2 次元ヒストグラム上で分類した結果を Fig. 7 に示す。アルゴン雰囲気下で積層した場合、大気中と比較してブローホールと高温割れの頻度が大きく低減することが確認された。ブローホールは大気中の酸素や窒素が溶融金属へ溶け込むことで生じるため、アルゴン雰囲気下で積層を行うことにより、発生頻度が抑制されたと考えられる。また、高温割れの頻度低減については、水冷機構による高い冷却速度が、金属結晶の緻密化および成長方向の均一化を促したため、結晶柱間を断割する応力が緩和されたことが原因として考えられる。チャンバを用いて積層することによって、全体の空孔個数は半分以下に減少し、特にリスクが高い  $40 \mu\text{m}^2$  以上の高温割れの発生頻度を 89% 抑制することに成功した。

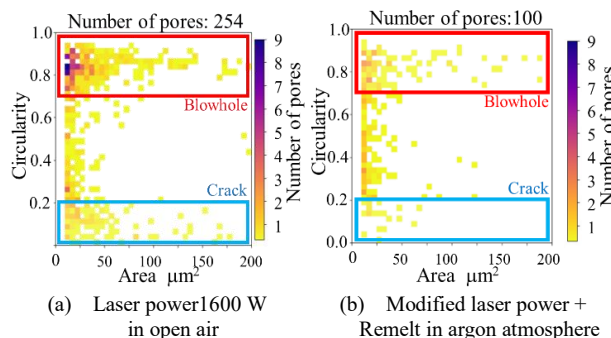


Fig. 7 2D histograms of circularity and area for pores

## 4.2 造形物の材料試験

### 4.2.1 硬さ試験

造形物の表面近傍において硬さ試験を行った結果、ベースプレートに近い位置でのビッカース硬さが Fig. 8 のように向上する傾向が見られた。これは、造形中の熱勾配の変化によって結晶粒のサイズが変化し、冷却効率が高いベースプレート付近で結晶粒が細くなり、造形物が強化された結果と考えられる。本装置を用いた場合には、大気中で造形した場合と比較して、冷却プロセスによる結晶粒の微細化により、全ての測定位置においてビッカース硬さが向上し、ベースプレートの冷却プロセスが造形物全体の金属組織に影響することが確認された。

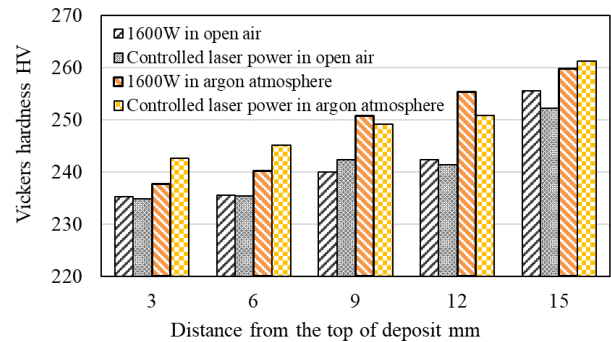


Fig. 8 Summary of Vickers hardness tests along with the distance from the top of deposit

### 4.2.2 引張試験

引張試験を行った結果、チャンバ内で造形した試験片は大気中で造形したものよりも引張強度が向上し、圧延材と比較してもより高い引張強度を持つことが Fig. 9 のように確認された。チャンバ内で積層を行うことで、内部欠陥が減少し高密度化、また結晶粒微細化による強化によって、引張強度が向上したと考えられる。一方で、伸びについては大気中よりも低い。冷却プロセスによって結晶粒が微細化したため、造形物が脆化したと考えられる。

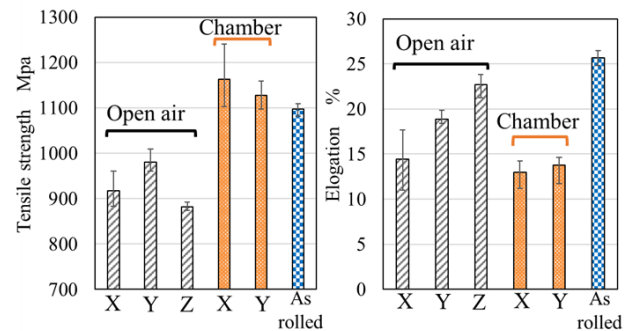


Fig. 9 The result of tensile test

## 5. 結論

本研究では、ベースプレートの冷却機構および不活性雰囲気チャンバを作製し、冷却プロセスや造形雰囲気が造形結果に与える影響を評価した。その結果、不活性雰囲気では造形物表面の酸化が抑制され、排熱効率の向上は造形物の熱だれを抑制することがわかった。チャンバ内での積層では、造形物の空孔率は最大 65% 減少し、特にブローホールや高温割れが激減できることを示せた。また、同装置を使用することにより、ビッカース硬さや引張強度の測定実験から、造形物の高強度化が確認された。

## 6. 参考文献

- [1] C. Zhong, A. Gasser, T. Schopphoven, R. Poprawe, "Experimental study of porosity reduction in high deposition-rate Laser Material Deposition", *Optics & Laser Technology*, Vol.75, pp. 87-92, 2015
- [2] R. Koike, T. Misawa, T. Aoyama, M. Kondo, "Controlling metal structure with remelting process in direct energy deposition of Inconel 625", *CIRP Ann.*, Vol. 67, No. 1, pp. 237-240, 2018.