

光加工機 Lasermeister 100A/101A の開発

上野和樹

Development of the Lasermeister 100A/101A optical processing machine

Kazuki UENO

ものづくりに新たな市場と産業を創出することを目的に、従来の「大きい」「高価」「操作が複雑」という金属3Dプリンターのイメージを刷新する光加工機「Lasermeister 100A」を2019年4月、さらに「5軸化による造形制約の開放」「対応材料の拡充」に対応した「Lasermeister 101A」を2020年5月にリリースした。本稿では光加工機の基礎となる様々な開発要素について説明する。

In April 2019, Nikon released the optical processing machine Lasermeister 100A that renews the image of the conventional large, expensive, and complex-operation metal 3D printer with an aim of creating a new market and industry for manufacturing. Thereafter, the optical processing machine Lasermeister 101A was released in May 2020, which has features such as opening of molding restrictions by 5 axes and the expansion of compatible materials. This paper describes various developmental factors that form the basis of optical processing machines.

Key words 光加工機, 金属3Dプリンター, 積層造形, レーザーメタルデポジション
optical processing machine, metal 3D printer, additive manufacturing, laser metal deposition

1 はじめに

2019年4月より、ニコン初の光加工機「Lasermeister 100A」、2020年5月より後継機種種の「Lasermeister 101A」をリリースした。

本稿では光加工機の基礎となる様々な開発要素について説明する。

2 レーザーメタルデポジション

ものづくりに新たな市場と産業を創出することを目的に、ニコン初の光加工機を開発した。光加工機は金属積層造形が可能な3Dプリンターの機能だけではなく、レーザーリメルトによる造形物の表面粗さの改善機能や、金属表面へのマーキング機能を有した光による複合的な加工機である。特にメイン機能である金属積層造形では、一般的なパウダーベッドフュージョン（PBF）方式ではなく、レーザーメタルデポジション（LMD）方式を採用しているのが特徴である。

PBF方式とLMD方式を解説する（Fig. 1）。PBF方式は平面上に材料である金属粉体を予め敷き詰め、レーザーを走査することで焼結し、各層ごとに繰り返し造形物を形作っていく方式である。造形精度が比較的良好なことがメ

リットである一方で、ある定型の母材上にはしか造形出来ないこと、金属粉体の使用量が多く、造形物が金属粉体に埋まってしまうことがデメリットである。LMD方式はまずレーザーを照射することでメルトプールを形成し、金属粉体を吹き付けながら溶融、凝固し、各層ごとに繰り返し造形物を形作っていく方式である。母材の形状を問わず付加工が可能であること、金属粉体の使用量も少なく、造形物は金属粉体に埋まらず外部から観察確認が可能であることがメリットである一方で、造形精度に課題が残る。「Lasermeister 100A/101A」はリーズナブルで将来性が高いと考えているLMD方式を採用し、様々な開発要素を盛り込むことで、造形精度の向上を実現した。

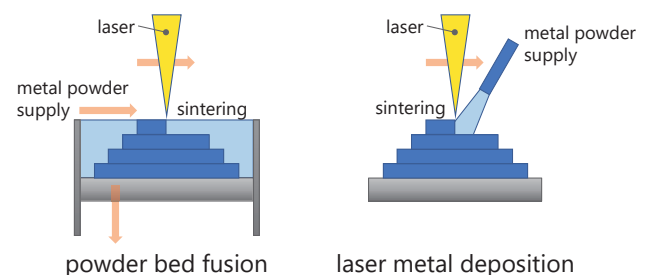


Fig. 1 PBF方式とLMD方式

3 使用可能な金属粉体材料と安全性

「Lasermeister 100A」ではステンレス鋼である SUS316L の金属粉体を使用可能である。これは特定化学物質障害予防規則を考慮の上、低 Mn 化処理を行っている。粉塵爆発性等の評価も実施済みであり、小ガス炎着火試験においても危険物に非該当の為、導入ハードルを低くすることが出来ている。装置そのものも欧州規格にて第三者認証機関の安全性の評価を実施しており、レーザー加工中はプロセス・チャンバー（加工室）内を窒素ガスで充填することで万が一の粉塵爆発への高い安全性を意識して手軽に使えることを追及している。また不可視の赤外線レーザーを加工光として使用するが、正面扉に設けたウィンドウは複数の遮光対策を講じており、内部が目視可能であるにも拘らず装置としてのレーザー製品クラスはクラス 1 を達成している。従って、レーザー機器の観点からも安全に使用できる。さらに「Lasermeister 101A」では専用のレシピを開発することで、高速度鋼いわゆるハイス鋼やニッケル系金属に対応している。

4 小型化と半導体レーザー

装置寸法は W : 850 mm × D : 750 mm × H : 1700 mm であり、従来の金属 3D プリンターと比較して格段にコンパクトになっており、省スペースを実現している (Fig. 2)。レーザーやその他機器は全て 1 つの筐体にパッケージングされており、電源と排気、窒素ガスを用意すればスタンドアロンで稼働が可能である。金属粉体を除く装置重量は 320 kg であり、「Lasermeister 100A」の加工範囲は W : 297 mm × D : 210 mm (A4 サイズ) × H : 200 mm、同プラットフォームを 5 軸化した「Lasermeister 101A」は ϕ 150 mm × H : 150 mm である。

小型化のポイントとして半導体レーザーの使用が挙げられる。通常、ファイバーレーザーなどの種光として用いられる半導体レーザーを、ニコン独自設計の光学鏡筒を介して加工へ直接使用している。最大出力は 200 W であり、空冷とすることで冷却水周りのユニット等を排除し、小型化に大きく寄与している。また半導体露光装置の開発技術を活かして、内部ユニットは適切な分割でモジュール化しており、外観デザインと機能性の両立を図った。装置正面にはオペレーター・コンソールと称したインターフェイスを備え、タッチパネルにて操作・各種センサによる装置ステータスの確認が可能である。

軽量コンパクトな装置を実現することで、実際の装置搬入の際などは、一般的なエレベーターに乗せ、配線・配管の接続後すぐに立上げが可能となり、設置場所を選ばない点で大きな評価を頂いている。

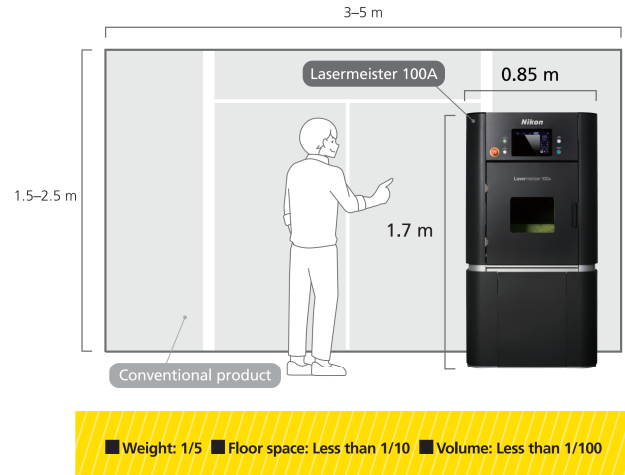


Fig. 2 軽量コンパクトな設計

5 3D アライメントによる段取りレス

「Lasermeister 100A/101A」の最大の特徴は、3D アライメントである。3D アライメントとは装置内に配したニコン独自設計の 3D スキャナーを用いて、加工対象物の位置決めを自動で実施する機能である。加工する母材の配置後に面倒な位置決め作業を行う必要が無く、段取りレスを実現している。

順を追ってプロセスを説明する (Fig. 3)。まず加工母材と造形物の 3D モデルを用意する。次に実際の加工母材を加工テーブル上の任意の位置に置く。従来では段取りとして、加工テーブルに対して加工母材をどの位置に置いたか、治具を使い固定した後に、スタイラス等を使って計測する。一方、3D アライメントでは搭載の 3D スキャナーを用いて、特異点の計測を行い、加工母材 3D モデルとマッチングを取ることで、加工母材の位置座標を認識する。これによりコンピュータ上の仮想空間において、加工母材 3D モデルが加工テーブルの認識した位置に配置され、現実の配置がコンピュータ上で再現される。後は造形物 3D モデルを加工母材 3D モデルの任意の位置に配置することで簡単に好きな位置に付加加工が可能となる。

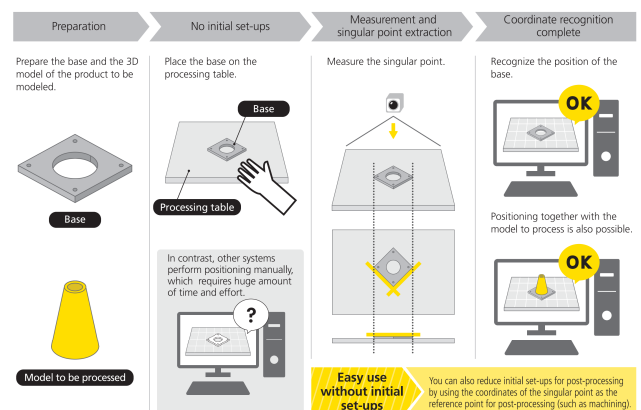


Fig. 3 3D アライメント

3D スキャナーは光切断方式、タイムオブフライト方式等、様々な計測方式がある中で、ステレオ視位相シフト方式を採用している。これは光源であるプロジェクターを用いて計測対象物に複数の縞パターンを投影し、2眼のカメラにより対象物の形状を計測する手法である (Fig. 4)。本方式を選択した理由は計測対象物である母材が金属であることから反射光を捉えにくく計測が難しい面があるが、方式比較の評価の中では比較的金属が測りやすかったこと、装置サイズと測長距離から適した方式であることが挙げられる。

基本的なプロセスはタッチパネルを介した簡単なグラフィカルユーザーインターフェイスにより迷うことなく、計測データの処理を含む計測時間は短時間で完了することが出来る。また、より簡便に3Dアライメントを使わずに鏡筒部に設けた2点のガイド光を用いて、手動によって加工開始点を教示する機能、複数点教示し仮想平面を指定する機能も設けている。

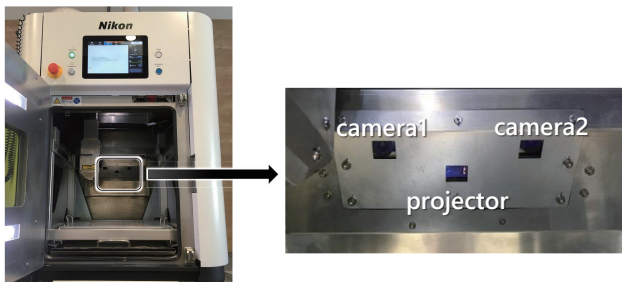


Fig. 4 内蔵のステレオ視位相シフト3D スキャナー

6 5軸化と造形制約の開放

駆動部の詳細について述べる。「Lasermeister 100A」はガントリー型のXYZ直交3軸ステージを備えており、プロセッシング・ヘッドと称した鏡筒部と粉体供給ノズルを駆動する構造となっている。「Lasermeister 101A」ではX軸周りの回転である θ_x 、Z軸周りの回転である θ_z の2軸を持ったチルト回転ステージを備え、母材側を駆動する5軸構造となっている。

それぞれの装置において加工パスはNCプログラムで用いられるGコードに対応している。「Lasermeister 100A」は3軸構成の為、Gコードの作成は手動で行うことも出来るが、装置に付属する専用ソフトにおいて、CADの3次元ファイルフォーマットであるSTLデータを用いて自動生成可能である。スライサーと呼ばれる機能によりモデルの高さ方向にある決まったピッチにて層ごとに加工パスを生成する。この際のプロセッシング・ヘッドの駆動速度、レーザーの出力、金属粉体の供給レートなどは材料に応じた最適化されたパラメーターが自動選択される。ユーザーはSTLデータを用意すれば複雑な造形レシピを評価せずともすぐに造形を行うことが出来るという点で大きな利便性向

上を実現している。また、既存の部品に付加工を行う際、加工母材3Dモデルに対して造形物3Dモデルが重なりあう配置も考えうるが、モデル差分の抽出機能を有している為、例えば一部の欠け箇所を補修するなどの使い方が容易に可能である。

一般的なPBF方式の金属3Dプリンターでは、例えばFig. 5のようなオーバーハング形状の造形を行う場合、サポート材と呼ばれる複数の柱構造を同時に造形する必要がある。これはオーバーハング部において下地が無く、レーザー照射により溶融した際、ダレを起こすのを防ぐためである。サポート材は造形を行うための加工パス生成時にユーザーによって設定される。精度への影響もさることながら、造形終了後、完成品にする為に、切断し除去することが大変に手間である。

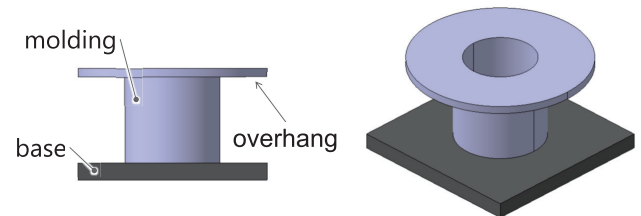


Fig. 5 オーバーハング形状の造形例

一方でLMD方式かつ5軸であればFig. 6のようにオーバーハング部においてチルト回転させることでサポート無しに造形することが可能である。3軸においてもある程度斜めにせり出すようなオーバーハング部の造形は可能であるが、大きな角度が取れない為、5軸化のメリットは非常に大きい。

5軸加工の場合、その加工パスを手動で作成することは困難である。その為、「Lasermeister 100A/101A」は一部の5軸加工CAMソフトによる加工パスに対応している。

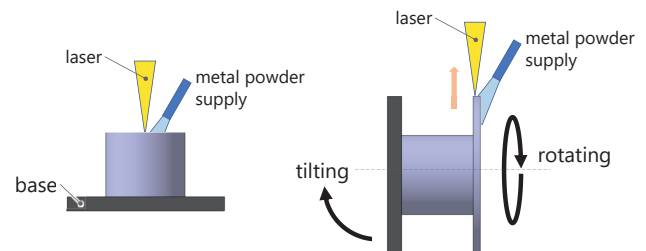


Fig. 6 オーバーハング形状のLMD方式5軸造形例

7 金属粉体供給装置

LMD方式では一般的に精度面に課題が残るが、一つのブレイクスルーとして金属粉体の供給レートの安定化が挙げられる。これはメルトプールへ投入される材料のボリュームに他ならず、安定したボリュームの造形ビードを形成することが最終的な造形物の精度向上へ繋がる。

特に金属粉体供給装置は独自の設計により、Fig. 7のよ

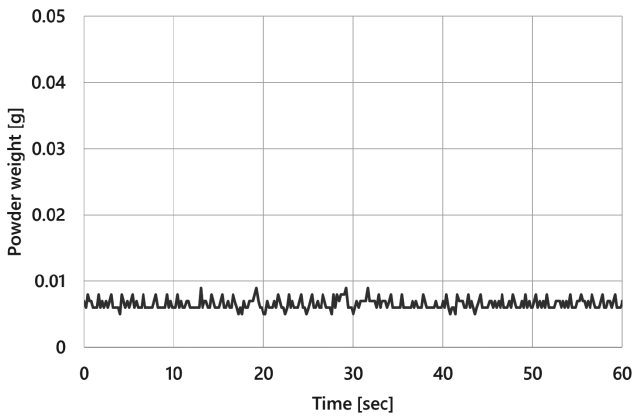


Fig. 7 独自方式による金属粉体供給レート安定化

うに短期において 5 mg も脈動が無い金属粉体供給を実現している。

実際に市販されている粉体供給装置を使用した造形ビードと独自設計による粉体供給装置を使用した造形ビードの比較画像を Fig. 8 に示す。これは第一層をライン状に複数造形した造形ビードである。造形ビードは細かな欠けや段差が解消され、金属粉体供給レートの安定化が造形品質に直結することが分かる。

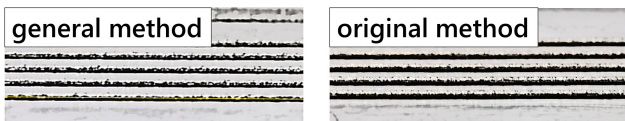


Fig. 8 造形ビードの比較

8 シミュレーションによるフィードフォワード制御

造形精度の追及において、造形物の形状は大きく影響を与える。通常ではスライサーの加工パス生成は造形形状に応じて自動で条件を変更することが難しい。「Lasermeister 100A/101A」は専用ソフトによりパラメーターは自動選択され、加工パスへと変換可能であることに加えて、独自開発のシミュレーションによる更なる最適化が可能である。シミュレーション結果を基に最適な造形パラメーターを事前に計算し、加工パスを直接調整する仕組みとなっている。

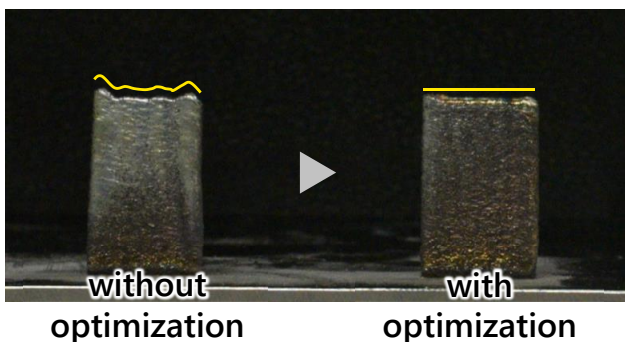


Fig. 9 加工条件の最適化と造形精度

本機能を使用することで造形形状を反映したフィードフォワード制御のように装置を動作させることで、LMD 方式における造形精度の課題をクリアしている (Fig. 9)。

9 造形物の機械的特性の例

造形物の機械的特性は最終製品としてのモノを考える場合に非常に重要な要素である。「Lasermeister 100A/101A」において標準的な材料である SUS316L 粉体を使用した社内規格の造形物試験片の機械的特性の例を説明する。

JIS 規格のステンレス鋼棒を参照比較する。まず熱処理などを加えていない造形物そのものの引張試験の実施結果を Table 1 に示す。サンプル数は 5 とし、最大応力、0.2% 耐力、伸びに関してステンレス鋼棒の規格値を満たすことが分かる。また、規格値は無いがヤング率に関しては Table 2 に示す通り共振法により測定した。PBF 方式で造形した試験片よりも高い数値を示し、概ね圧延材と遜色ない数値を示すことが分かる。

Table 1 引張試験結果

試料 No.	最大応力 [MPa]	0.2% 耐力 [MPa]	伸び [%]
1	498	309	52.2
2	494	327	51.5
3	495	330	48.7
4	496	328	49.9
5	495	328	49.8
規格値	480以上	(175以上)	40以上

Table 2 共振法によるヤング率試験結果

試料	温度 [°C]	ヤング率 [GPa]
ニコン製	25	184
PBF 方式製	25	168
圧延材 (圧延方向)	25	187
圧延材 (圧延直交方向)	25	194

続いて硬度試験を行った結果を Table 3 に示す。サンプル数は 3 とし、複数個所を計測した最小値、最大値および平均値を示す。固溶化熱処理を行わない状態では造形開始点である母材に近い領域で硬度が規格値 (HRBS90以下) を越える箇所も計測された。一方で固溶化熱処理を行うことで全ての計測点で規格値を満足した。

次に電子線後方散乱回折による結晶解析の逆極点図方位

Table 3 硬度試験（固溶化熱処理前後）結果

HRBS	熱処理前			熱処理後		
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 1	No. 2	No. 3
Min	88.5	89.0	88.0	84.5	84.5	84.0
Max	94.5	93.5	94.5	88.0	88.0	88.0
Avg	91.8	91.6	91.7	86.2	85.9	85.6

マップを Fig. 10 に示す。比較の為に、PBF 方式製と圧延材も解析を行った。マップを見ると分かるように造形物の結晶粒は圧延材に近いように大きく、PBF 方式製は結晶粒が小さいことが分かる。いずれの結晶も配向はなく、造形物と圧延材は色むらが少ないことから結晶粒内歪が少ないと考えられる。

以上の結果から、造形物の機械的特性としては PBF 方式と比較して圧延材に近いことが分かる。これは LMD 方式がメルトプールを形成し、金属粉体を噴射して完全に溶融、凝固させること、PBF 方式のような高速なレーザーのスキャン動作ではなくプロセッシング・ヘッドの物理的な駆動による造形の為、造形物自体の急激な熱変化が少ないことなどが原因として推測できる。

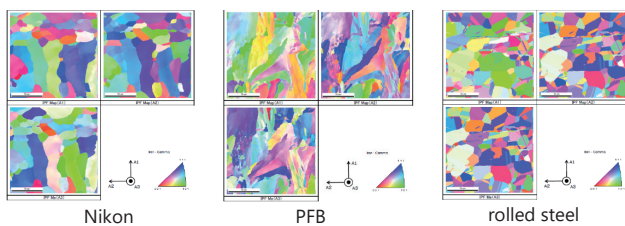


Fig. 10 逆極点図方位マップ

10 造形物サンプル

「Lasermeister 100A/101A」による造形物サンプルを示す。Fig. 11 はラティス構造付き熱交換器の造形例である。内部にはサポート材レスのオーバーハング角度を保った冷媒流路を設けつつ、ラティス構造を造形することで表面積を増やし熱交換効率を大きく上げる構造である。これは従来の機械加工では困難な形状である。

Fig. 12 は配管の損傷を模擬した亀裂を入れ、造形により

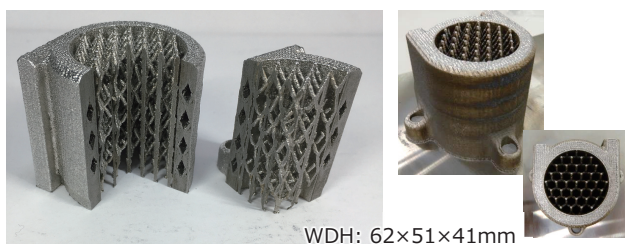


Fig. 11 ラティス構造付き熱交換器

肉盛修復をし、仕上げを行った修復サンプルである。一般的な溶接による肉盛修復では熟練した溶接工による職人業が求められるが、「Lasermeister 100A/101A」を用いることで簡単にこのような修復が可能である。

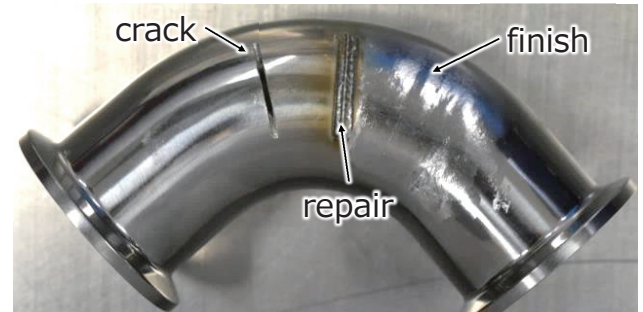


Fig. 12 配管損傷の修復

Fig. 13 は既存部品であるフランジの上に直径 14 mm のパイプを 5 軸により付加加工し、表面仕上げを行ったサンプルである。このように造形範囲内で自由な位置で曲げ箇所を設けることが出来ると共に、自由な角度を設計し造形することが可能である。フランジへの直接付加加工である為、PBF 方式のように造形物のワイヤークットが必要ないことが大きな利点である。従来工法では手による曲げ加工や角度に応じた金型を用意する必要があり、溶接の作業も伴う。

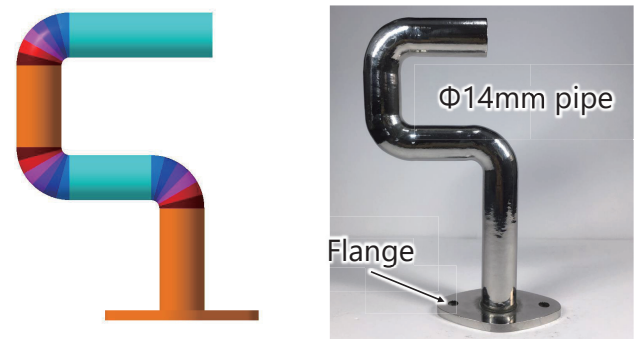


Fig. 13 5 軸によるパイプ造形サンプル

11 まとめ

「Lasermeister 100A/101A」はものづくりに新たな市場と産業を創出することを目的に、従来の「大きい」「高価」「操作が複雑」という金属 3D プリンターのイメージを刷新する為、開発した装置である。様々な独自開発アイテムを盛り込むことで、LMD 方式の課題であった造形精度の向上を図ると共に、ユーザーにとっての簡易な操作性を追求した。紹介した造形物サンプルの枠に収まらないアイデアも本装置により実現が可能である。

今後はユーザーにとっての大きな課題であるペインポイントに直接応えられるような機能の進化を通して材料加工の新たな可能性に引き続き挑戦していきたいと考える。



上野和樹

Kazuki UENO

次世代プロジェクト本部

第一開発部

1st Development Department

Next Generation Project Division