

光加工機 Lasermeister1000SE/1000S の開発

江上茂樹

Development of the Lasermeister1000SE/1000S Optical Processing Machine

Shigeki EGAMI

光加工機はニコンの半導体露光装置の技術を応用して開発された加工機であり、2021年9月に初の光除去加工機である「Lasermeister1000S」をリリースした。Lasermeister1000Sの座標系は高精度・広範囲に管理されており、加工データを忠実に再現することができる。光源には超短パルスレーザーを採用しており、あらゆる材料に対して非熱のレーザーアブレーション加工を実現できる。さらに、機上には3D光計測機を搭載しているため、計測結果を正確にフィードバック加工することが可能である。加工パスはCADデータ、加工パラメーター、対象物の3D計測結果から自動生成されるため、作業者のスキルに依存せずにサブマイクロメートルの高精度加工も実現できる。本稿では、これらのLasermeister1000Sの開発要素と、アプリケーションとして考えているきさげ、精密金型、セラミックス材料の加工事例を解説する。

An optical processing machine has been developed by applying Nikon's semiconductor lithography technology. The first optical subtractive processing machine, "Lasermeister1000S," was released in September 2021. The coordinate system of the Lasermeister1000S is adjustable with high accuracy over a wide range. Therefore, model data can be accurately reproduced with high fidelity in processing. An ultra-short pulse laser is used as the light source, with which non-thermal laser ablation processing can be applied to almost all materials. Furthermore, because a high-precision three-dimensional (3D) optical measuring device is mounted on-machine, accurate feedback of the measurement results to the laser processing for improved process quality is realized. The machining path is automatically generated from computer-aided design (CAD) data, processing parameters, and 3D measurement results of the object; hence, sub-micrometer processing accuracy can be achieved without relying on the operator's skill. In this paper, the development of the aforementioned elements is explained and processing examples with scraping, precision molding and processing on ceramic material are discussed, which are areas of application for this optical processing machine.

Key words 光加工機, 超短パルスレーザー, レーザーアブレーション, 機上3D計測
optical processing machine, ultra-short pulse laser, laser ablation, on-machine 3D measurement

1 はじめに

光加工機は、ニコンが長年にわたり蓄積してきた半導体露光装置の技術を応用して開発され、2019年4月に金属3Dプリンタである「Lasermeister100A」を初リリースした。コンパクトかつ低コストで高精度の金属積層造形を実現できるこの光加工機は市場のニーズをさらに取り込み、2020年には5軸化、2021年にはチタン合金対応など機能を強化したモデルもリリースした。

ニコンの光加工機はこの金属3Dプリンタである“+（プラス）”の積層造形加工に留まらず、“-（マイナス）”の除去加工の製品開発も進めてきた。この加工機は機上の光計測機による精密3D計測と超短パルスレーザーによる非熱・非接触加工を繰り返して、高精度な面形状加工を実現することが可能である。この高精度面形状加工機は、

「Lasermeister1000SE」「Lasermeister1000S」（以降、総称してLasermeister1000Sと呼ぶ）として2021年9月にリリースした（Fig. 1）。



Fig. 1 高精度面形状加工機 Lasermeister1000S

2 Lasermeister1000S のコンセプト

Lasermeister1000S は、“Remake manufacturing（モノづくりを、つくり変える）”をコンセプトとした高精度な面形状加工や微細加工を実現する新しい加工機である。この加工機は、従来の加工機で常識だったCAM（Computer-Aided Manufacturing）・条件出し・チャッキング・基準面出し等の段取りを省略もしくは自動化することができ、刃物工具の摩耗や加工対象物の材料・形状・剛性等の制約で難しかった加工をマイクロ～サブマイクロメートルの精度でスキル不要に実現することが可能となる。

各製品モデルのうち、「Lasermeister1000SE」は、超短パルスレーザーと機上の非接触3D光計測を用いた加工・計測システムを搭載し、高精度な除去加工を実現するエントリーモデルである。この基本性能に加え、「Lasermeister1000S」はより高精度な位置決め機構や座標補正システムを搭載し、広範囲に高精度な面形状仕上げや微細加工ができるスタンダードモデルとなる。本稿ではこの Lasermeister1000S の特長やアプリケーションを解説する。

3 Lasermeister1000S の特長

Lasermeister1000S の特長について、その開発要素を含めて以下に紹介する。

3.1. 高精度・広範囲に管理されたグローバル座標

CAD（Computer-Aided Design）で設計したデータを忠実に加工で再現するためには、加工機は正確な座標系を構築・管理しなければならない（Fig. 2）。汎用加工機の座標系は、作業者のスキルや段取りによって必ずしも正確な座標系を広範囲に構築できないが、Lasermeister1000Sの座標系はニコンの半導体露光装置で培った高精度な補正システム（傾斜・スケール・直交度等）を適用しており、作業者のスキルに依らず、正確なグローバル座標系を構築することができる（Fig. 3）。従来の高精度加工機は、環境温度変動によって生じるドリフトを抑制するために、多くの労力

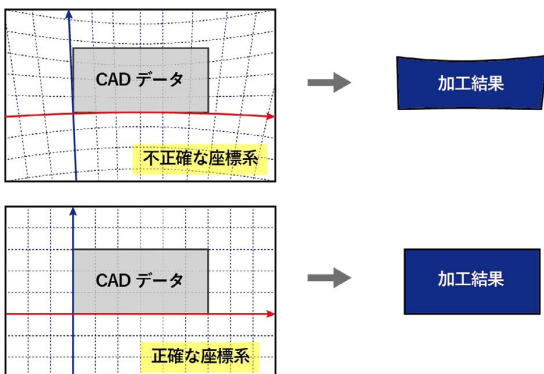


Fig. 2 座標系が及ぼす加工への影響イメージ

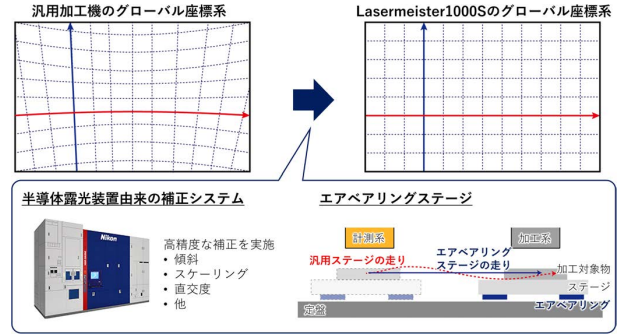


Fig. 3 Lasermeister1000S のグローバル座標系

を割く必要があったが、本加工機はこの高度に補正された座標系を逐次補正して、管理することも可能である。また、光によって非接触に計測・加工できる本加工機は、エアベアリングと相性が良く、ステージにこの技術を採用している。高い平面度で仕上げられた定盤に対して、ステージに備え付けられたエアベアリングが滑走することにより、駆動軸によるガタつきを生じさせることなく、ストローク全域で高い走り再現性を確保できる。

3.2. 超短パルスレーザーアブレーションによる幅広い形状・材料への加工

レーザーアブレーションは、対象物の表面に高強度のパルスレーザーを照射することで表面の物質が爆発的に飛散・蒸発する現象である。熱伝導にかかる時間より短いパルス幅の超短パルスレーザー（フェムト秒～数ピコ秒）を用いたアブレーション加工は、レーザーのエネルギーを熱に変化させることなく材料を除去することができるため、CWレーザーやナノ秒レーザーの加工に比べ、加工対象物の熱変形やHAZ（Heat Affected Zone）を生じさせずに加工できる（Fig. 4）。また、レーザー加工は非接触で反力ほぼゼロでの加工ができることから、チャックレスで加工でき、薄板の母材や低剛性部品において、従来加工機で問題

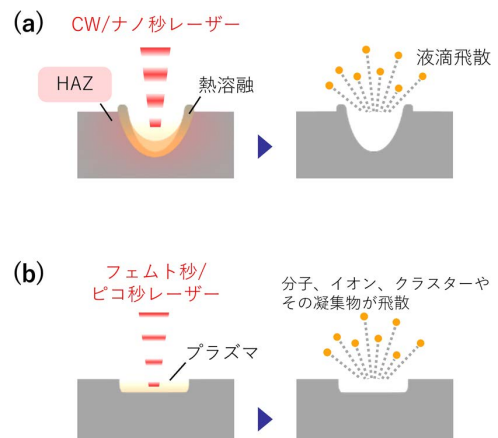


Fig. 4 レーザーパルス幅による加工の違い：(a) CW/ナノ秒レーザーによる熱加工，(b) フェムト秒/ピコ秒レーザーによる非熱加工

となっているチャッキングや加工力による変形を起こさずに高精度な加工を実現することができる。

超短パルスレーザーによるアブレーション加工のメリットとして、加工する材料の制約が少ないことも挙げられる。超短パルスレーザーは極めて短いパルスで生じる非線形な光子挙動により、光子エネルギーより大きいバンドギャップを持つ材料（光を吸収しない材料）に対しても加工できる特徴がある。Lasermeister1000Sで採用している超短パルスレーザーは、一般的な金属はもちろん、超硬・ダイヤモンド等の硬くて加工が難しい材料や、セラミックスや光学ガラスといった破損しやすい脆性材料等、幅広い材料への加工が可能である（Table 1）。

このように超短パルスレーザーを用いたレーザーアブレーションは被加工品への影響を最小限に抑制し、幅広い形状や材料への加工を実現できる。

Table 1 Lasermeister1000S で加工できる材料

汎用金属	高反射材	難削金属材	セラミックス・焼結材・半導体	その他
オーステナイト系ステンレス SUS303, SUS304	銅 C1100P	ニッケル基合金 Ni 基合金	ケイ素 Si	ガラス 石英, BK7
マルテンサイト系ステンレス SUS420, SUS440C				
フェライト系ステンレス SUS430	金 Au	タンタム W	窒化ケイ素 Si ₃ N ₄	炭化ケイ素 SiC
炭素鋼 S50C				
クロムモリブデン鋼 SCM440	プラチナ Pt	ダイス鋼 SKD11	窒化アルミニウム AlN	ダイヤモンド 単結晶ダイヤモンド, PCD
亜鉛 Zn				
真鍮 (Cu-Zn) C2801P	アルミニウム Al	チタン合金 TAP6400H	アルミナ Al ₂ O ₃ 96%	超硬合金 WC
クロム銅 (Cu-Cr) Z3234 2種				
アルミニウム合金 (Al-Mg) A5052P				
アルミニウム合金 (Al-Zn-Cu) A7075P		純チタン TP340H		

加工精度や安全対応は材料によって異なる。上記以外の材料の加工も可能。

3.3. 机上3D計測によるオンマシンフィードバック加工

Lasermeister1000Sに搭載されている机上3D計測は光干渉技術を用いた計測であり、高精度かつ高スループットな3D計測を可能とする。この机上3D計測で加工対象物の面形状を高精度に計測することで、加工目標形状に対する加工量を正確にフィードバックすることができる。この高精度計測による加工へのフィードバックを機内で繰り返すことで、容易に所望の高精度面を得ることが可能となる（Fig. 5）。

オンマシンフィードバック加工を用いた共通平面出し加工（複数箇所の平面度を均一にする加工）の実施例を Fig. 6 に示す。母材は SUS304 の薄板（80 mm × 75 mm × 1 mm 厚）で、この 4 隅に 10 mm × 10 mm の共通平面出し加工を行った。この SUS の薄板は母材の状態ですら約 100 μm のうね

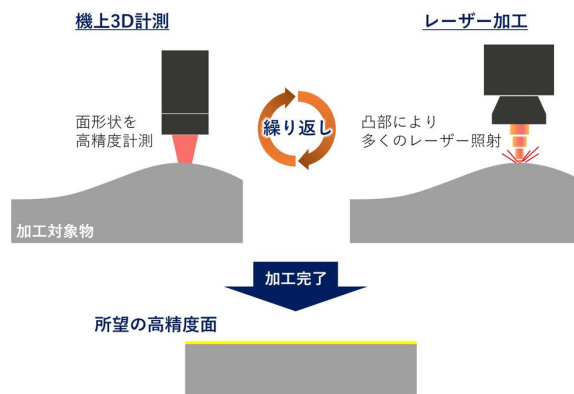


Fig. 5 机上3D計測によるオンマシンフィードバック加工

りを持っていたが、加工した領域はカラーコンター図からもわかるように幾何公差サブマイクロメートルの極めて高い共通平面度（0.4 μm）で加工ができていることがわかる。このような薄板の超高精度加工を研削盤で実現するのは非常に困難であるが、Lasermeister1000Sはこれをチャックレスかつスキル不要で容易に実現することが可能である。

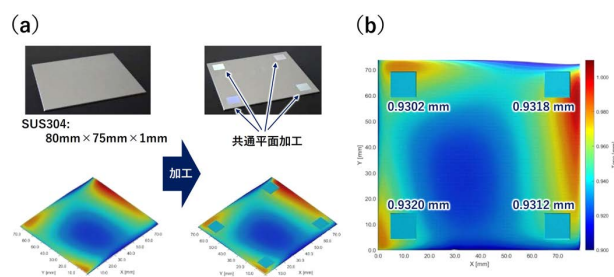


Fig. 6 SUS304薄板の共通平面出し加工：(a) 加工前後の加工対象物の写真と高さの斜めコンター図、(b) 加工後の平面コンター図；共通平面度 0.4 μm を達成

3.4. オンマシンCAM・3Dアライメントによる加工データの自動生成

既存のNC工作機械は、CADで作製した設計モデルを元にCAMで加工プログラムを作成する必要がある。CAMは工程の作業効率を上げ、複雑な加工形状にも対応でき、加工シミュレーションもしやすいが、その反面、プログラミングに専門知識が求められ、作業者のスキルによって作成にかかる時間やデータの質がばらついてしまう。

Lasermeister1000Sは装置のソフトウェアにCAM相当の機能（オンマシンCAM）を組み込んでいる（Fig. 7）。装置にインプットするのは、母材と加工目標の3Dモデル、加工・計測パラメーターのみである。加工領域や加工パスはこれらのモデルデータやパラメーターと机上3D計測結果から自動生成されるため、作業者の専門知識が不要となり、プログラムの作成時間も短縮できて、データの質が安定する。

加工対象物の位置決めを自動で実施する“3Dアライメント”による段取りレス化もLasermeister1000Sの特長の一つとして挙げられる。従来の加工機は、作業者が母材を治

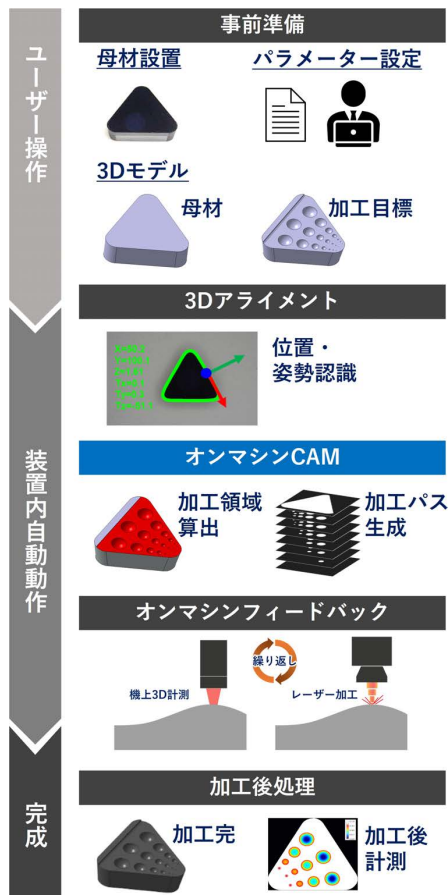


Fig. 7 Lasermeister1000S の加工フロー

具で固定し、スタイラスを複数ポイント接触させて位置計測を実施するが、非常に煩雑な作業である。Lasermeister1000Sはオンマシン計測が可能であるため、このような作業を自動で実施することができる。

3DアライメントのプロセスをFig. 8に示す。まず、母材をテーブルの任意の位置に設置する。Lasermeister1000Sには光切断方式による広域3Dスキャナと光干渉方式によるファイン3Dスキャナの2種類の3D計測機を搭載しており、まずは広域3Dスキャナにより短時間で母材の全体像を計測し、母材の3Dモデルと3Dマッチングを行う。このマッチング結果より、母材の設置位置や姿勢を自動的にアライメントすることができ、コンピューター上の仮想空間に現実の母材の位置や姿勢を再現できる。ただし、広域3Dスキャナでの3Dアライメントは数100 μmの誤差を持っているため、より精度の高いアライメントが必要となる場合は、ファイン3Dスキャナによるアライメントを実施する。広域3Dスキャナの結果に基づき、ファイン3Dスキャナで母材の複数領域のエッジ位置や高さを精確に計測することで、加工空間の母材のモデル位置と姿勢をマイクロメートルのオーダーでファインに位置出しすることが可能となる。この母材の設置位置や姿勢をもとに加工目標の3Dモデルを仮想空間に配置し、入力した加工パラメーターで加工を精確に実施することが可能となる。

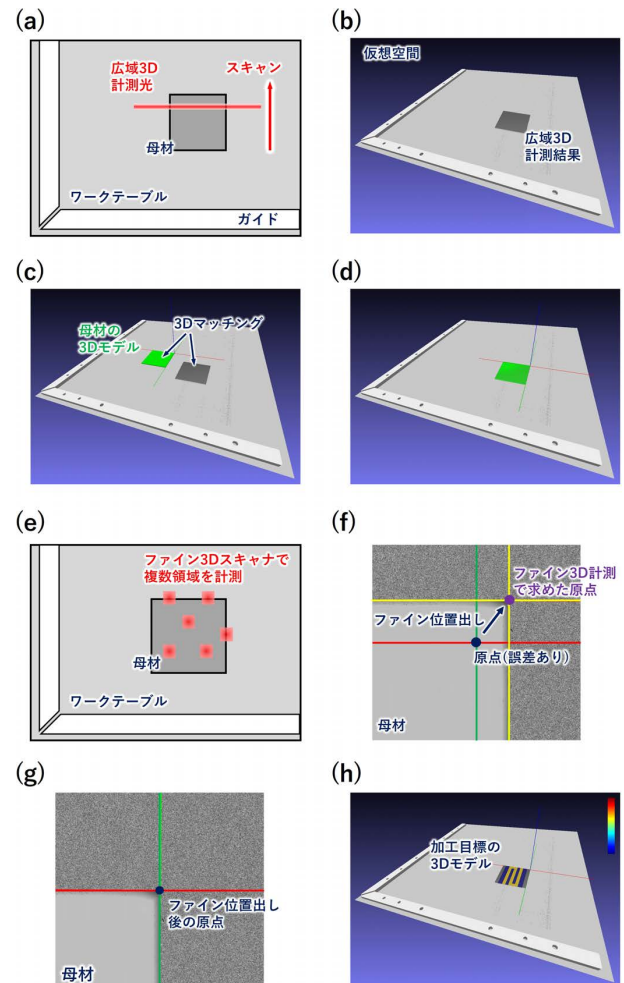


Fig. 8 3Dアライメントのプロセス：(a) 広域3Dスキャナによる母材計測、(b) 仮想空間への広域3Dスキャナ計測結果の配置、(c) 母材の3Dモデルと計測結果の3Dマッチング、(d) 3Dマッチング結果、(e) ファイン3Dスキャナで母材の複数領域のエッジ位置や高さを計測 (f) ファイン3Dスキャナ計測結果に基づく母材原点のファイン位置出し、(g) ファイン位置出し結果、(h) 仮想空間への加工目標の3Dモデルの配置

4 アプリケーション

これらの技術が統合されたLasermeister1000Sは様々なアプリケーションに対して、幾何公差マイクロ～サブマイクロメートルの高付加価値加工を容易に実現することができる。アプリケーションの例としては、精密金型・精密平面・刃物工具・砥石・低剛性部品・難削材加工（セラミックス・ダイヤモンド・超硬・光学ガラス等）・微細加工と多岐に渡るが、ここではその一部の事例を紹介する。

4.1. きさげの再現加工

きさげは研削盤を代表とする工作機械の摺動部や基準面となる土台に用いられ、工作機械には欠くことができない重要技術である。従来の加工機では実現できない超平面仕上げであるきさげ加工は、高精度な平面かつ、面と面が滑

らかに動くように数ミクロンの油だまりを職人が手感で作り出す伝統的な加工技法を未だに必要とする。このきさげをデジタルに再現した加工を Fig. 9 に示す。

母材にはねずみ鋳鉄 (FC300) を用意し、母材の中央 60 mm×60 mm に職人が加工したきさげを再現加工した (加工時間：35分)。Fig. 9 (a)-(c) には加工後の写真、高さコンター図とプロフィールをそれぞれ示している。Fig. 9 (c) のプロフィール結果からわかるように、加工後形状は目標形状に対してサブマイクロメートルで忠実に再現できており、習熟に10年以上必要とされるきさげ加工の自動化を実現できた。摺動性評価も別ケースで実施しており、きさげ職人が作ったきさげと遜色ないデータも得られている。また、油だまりのパターンを任意な形状かつ、規則的に並べることが容易となり、作業者ごとの質のばらつきをなくすることができる。このように、本加工機がきさげのデジタルマニュファクチャリングを実現する強力なツールであることを実証できた。

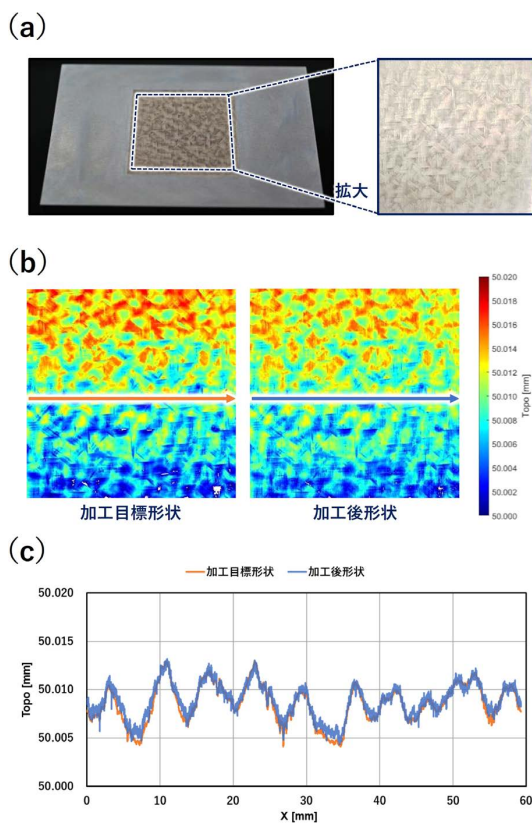


Fig. 9 きさげの再現加工：(a) 加工したきさげの写真、(b) 加工目標と加工後形状の高さのコンター図と (c) それぞれの形状プロフィール

4.2. 燃料電池セパレーターの金型加工

燃料電池のセパレーターはプレス成形で作製されるが、その金型材料としてダイス鋼・高速度工具鋼・超合金等の硬さと耐摩耗性が優れた材料が用いられるため、従来の加工機で高精度加工を実現するのは非常に困難である。加えて、セパレーター金型の加工形状は複雑で加工難易度も

高い。セパレーターにはガスが流れる流路があるが、ガス拡散を促進させるために異形状な流路を作製することがあり、スタックして用いることから高い平面度も求められる。このセパレーター金型をイメージしたモデルの加工事例を Fig. 10 に示す。

本加工の母材にはダイス鋼である PD613 (大同特殊製鋼) を用いた。加工目標の3D モデルの流路には、絞りやテーパーを取り入れ、自由度の高い構造をこの金型材料に対して加工した (加工時間：3.3時間)。流路には45度のテーパーが設けられており、それを精密に再現できていることが加工結果からわかる。加工後形状と加工目標形状との差分の平均値は 1.3 μm と非常に高い精度で面形状を加工できており、表面粗さは最深部で Ra 0.15 μm であった。超硬合金においても同様な加工が実施できることを別事例で確認しており、精密金型のアプリケーションの一つである燃料電池用セパレーター金型の加工を実証することができた。

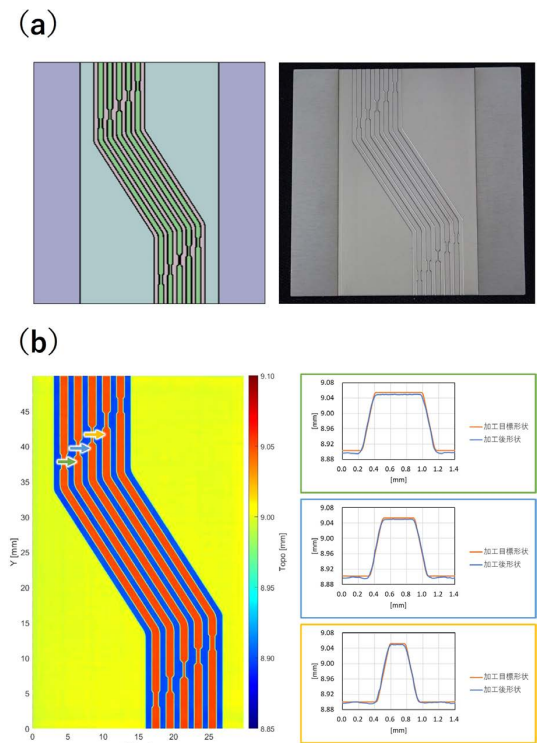


Fig. 10 燃料電池のセパレーター金型をイメージしたモデルの加工事例：(a) 加工目標の3D モデルと加工後のワーク、(b) 加工後形状の高さコンター図と絞り部の流路の断面プロフィール

4.3. セラミックス材の微細形状加工

アルミナをはじめとするセラミックス材は、機械的強度、耐摩耗性、電気絶縁性に優れており、シリコンウェハを高精度に平面把持する静電チャックや真空チャックの構造材料として用いられる。これらチャック部品の表面にはゴミ挟みを抑制するために直径数 100 μm かつ高さ数 10 μm の何万本もの微細ピン形状が形成されているが、生産性が求

められる部品であり、短時間で加工しなければならない。通常このピン形成にはブラスト加工が用いられる。ブラスト加工は表面研削、梨地加工、表面改質を工作機械のツールが届かない箇所でも処理することができるが、マスクングやマスク剥離工程の段取りが煩雑かつ自動化も難しく、加工形状の自由度も工程が複雑で制約も多い。そこで、Lasermeister1000Sによるセラミックス加工の事例を紹介する。

Fig. 11 はアルミナ基板に溝加工，共通平面出し加工，微細ピン加工を実施した結果である。溝加工はエアベアリングや静電チャックのガス流路用の溝を想定した加工である。各溝において目標加工深さ 20 μm を $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の加工精度で実現できていることがわかる (Fig. 11 (b))。共通平面出し加工はSUSの加工事例と同様に平面度0.4 μm をアルミナに対しても実現することができた (Fig. 11 (c))。ピン加工は静電チャックや真空チャックをイメージし、直径 250 μm と 500 μm のモデルで加工を実施した。直径 250 μm のピン加工の高さは $22.0 \pm 0.9 \mu\text{m}$ とこちらもピン毎のバラつきを抑制した加工が実現できている (Fig. 11 (d))。チャック部品の加工精度はウェハの平面把持時の歪みだけではなく、ウェハの温度を一定に保つための温度制御性にも影響を与えるため、ピンの高さや溝深さは均一に加工することが要求されるが、Lasermeister1000Sではマイクロ～サブマイクロメートルでこれらを制御可能であることを実証できた。

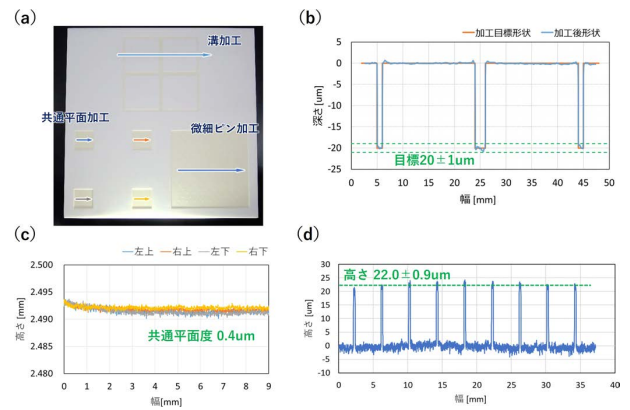


Fig. 11 アルミナ基板への微細形状加工：(a) 微細形状を加工したアルミナ基板の写真，(b)-(d) それぞれ溝加工，共通平面加工，微細ピン加工の断面プロファイル

5 まとめ

Lasermeister1000Sは、モノづくりの現場で行われる様々な設計を抜本的に変え、“今まで常識だった工程”の無駄を削減し、“今まで不可能だった加工”を実現させる新しい加工機である。多種多様な機械部品のひとつひとつを光で簡単に加工できるようになることは、モノづくりに革命をもたらす。我々はこれを実現すべく、今後、自動加工条件出し・加工ムラ補正等の加工支援ツールの導入や5軸ステージ・レーザーリメルト等の要素開発を進め、ユーザーにとってさらに価値ある光加工機を提供していきたいと考えている。

江上茂樹 Shigeki EGAMI
次世代プロジェクト本部 第一開発部
1st Development Department
Next Generation Project Division



江上茂樹
Shigeki EGAMI