

# ナノ秒パルスファイバレーザの強みを 生かしたレーザエングレービング

ジャック・ガブジル

## 品質と生産性を高めるためにパルス特性を最適化する技術

レーザエングレービングは、マーキングと一括りにされることの多い用途の1つだが、実際には全く異なる。エングレービングは、材料を物理的に除去して、加工対象基板に改変された形状を作成する処理であるというのが、最も適切な定義である。

エングレービングの応用分野は非常に多岐にわたり、鋼鉄から石材に至るまで、日常生活のさまざまな側面に関連している。次に自動車に乗るときには、ダッシュボードや内装トリムに手を滑らせてみてほしい。そのレーザーレットの手触りは、動物の皮とはまったく異なるはずだ。それは、デジタル処理によって作成され、それらのプラスチック部品の製造に使われるスチール金型に複雑に彫り込まれている。その処理には通常、ナノ秒パルスファイバレーザが用いられる。硬貨や金属金型の製造もレーザエングレービングの領域で、宝石業界では、貴金属のレーザ加工がますます広く採用されている。職人がパンチやハンマーを使って商品に刻印を入れるというイメージがあるかもしれないが、今ではそれはまれなケースで、そうした処理はすべて、レーザによって行われている。

超高速レーザや連続波(Continuous Wave: CW)レーザでさえも、他の種類のレーザをエングレービングに使用できる用途も存在するが、大多数の用途で使われているのは、ナノ秒パルスファイバレーザである。その短いパル

ス幅と高いピーク出力が、この用途に非常に適している。実際、ユーザーがパルス幅を選択可能で、最大4MHzの繰り返し周波数を備える主発振器出力増幅器(Master Oscillator Power Amplifier: MOPA)は、品質と生産性を高めるためにパルス特性を最適化する手段をユーザーに提供するため、この用途に最適である。英SPIレーザーズ社(現トルンプ社傘下)の「PulseTune」技術はその一例で、3ns~2μsという3ケタにわたる範囲でパルス幅を制御することができる。

## 品質の達成

そのプロセスは、原理的には比較的単純明快である。レーザ光の入射パルスによって基板の一部が溶融し、溶融プールが生成される。続いて、表面の一部が蒸発して、溶融部分に反跳圧がかかり、溶融射出が生じる。これが、材料除去の主なメカニズムである。ここで、パルスエネルギーが高いほど多くの材料が除去され、ピーク出力が高くパルス幅が短いほど品質は高くなるという、よくある誤解を否定しておきたいと思う。このプロセスは非常に複雑で、効果的に適用できる厳格な規則は存在しない。パルス特性、光学配置、処理/走査パラメータの間には、微妙なバランスがあり、エンドユーザーの要件に基づいて最適化する必要がある。エンドユーザーの要件は、品質か除去率かだが、両者は互いに相反する



図1 200Wの「EP-M」レーザによるVINマーキングの例。

ためである。

エングレービングは、レイヤベースの材料除去処理であり、1回のパスで除去される材料は、わずか数十ミクロンである。この除去処理は比較的低速で、除去率は、立方ミリメートル毎分(mm<sup>3</sup>/分)の単位で表され、利用できる平均出力によって左右される。高い表面品質と高い除去率の両方を達成するためのカギとなるのは、採用する加工手法である。基本的なラスタ走査では、溝が形成される可能性があるため、一般的に不適切である。その浅さと粗さが許容できる場合以外は、使用しないほうがよい。レーザウォブリングは、ラインや単純なテキストのエングレービングのみが必要という場合に、適用可能である。この手法は、車両識別番号(Vehicle Identification Number: VIN)マーキングなどの用途に、非常に適している。VINマーキングでは、塗装後もマークが見えるように、また、セキュリティの観点からも、マークを削り取ることを難しくするために、かなりの深さが必要である。このような種類の用途では、レーザ源の多用途性が非常に役に立つ。パラメータの簡単な変更によって、パルス幅を短くして、パルス周波数を上げることにより、同じレーザを使用して、エングレービ

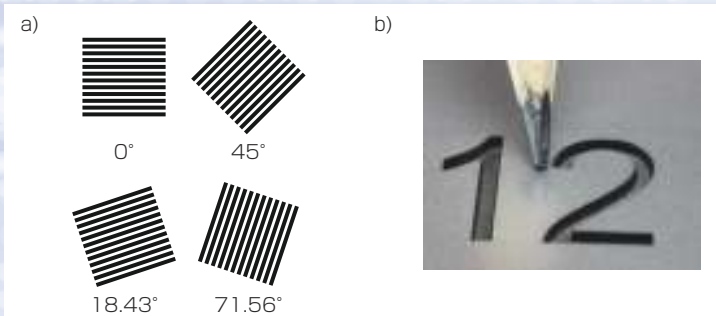


図2 (a)は、アンチモフレ(干渉縞防止)用のハッチング角度。(b)は、それらによるエングレービング例。

グ処理による酸化物と表面スパッタを、効果的に除去することができる(図1)。

しかし、より広い面積やより複雑な形状に対しては、レイヤベースの方向的な手法を適用して、方向的な処理の効果を平均化またはランダム化する必要がある。後続のパスを数度ずつインクリメントさせるだけの処理により、結果は確実に向上する。干渉縞(モアレ)の最小化に基づく一連の固定角度を使用することが、最良のソリューションである。これは、印刷業界において均質で一貫した印刷品質を得るために、長年にわたって広く使用されている手法で、レーザーエングレービングにおいて卓越した効果を発揮することが示されている(図2)。

### カギはパルスにあり

上述のとおり、プロセスの最適化は、時間はかかるがそれだけの価値がある作業であり、除去率が2倍になるか、粗さが半減する場合もある。パルスパラメータだけでなく、パルス間(P-P)のオーバーラップやライン間(L-L)の間隔という幾何学的なパラメータも検討する必要がある。選択したパラメータの相互依存性を示す材料見本を使用することにより、この最適化の大部分を構造化及び半自動化することができる。例えば、真ちゅうのエングレービングにおいて、平均出力を一定にしてパルス幅とパルス周波数を変化させる

と(P-PとL-Lは固定)、パルスエネルギーが最大(ピーク出力が最大でパルス幅が最短)のときに、材料の除去率が非常に低いことがわかる。材料見本からは、繰り返し周波数を上げることによってパルスエネルギーとピーク出力の両方を下げる場合と、パルス幅を長くする場合に、材料除去率が大幅に向上し、最大で40%向上する場合もあることがわかる。もう1つ興味深いのは、同じ試験を異なる材料に対して行うと、結果は異なるということである。それは、意外なことではないかもしれない。導電率、熱容量、融点、流体粘性など、主要な材料属性は多数存在するが、そのすべてが材料によって大きく異なり、プロセスに関係するためである。従って、アルミニウムと鋼鉄では、最適なパラメータは全く異なるため、試行錯誤による調整が必要である(図3)。

エングレービング加工に対するさまざまなモデルやシミュレーションが、研究者らによって提案されているが、存在するすべてのプロセスパラメータと材料を網羅するものは、まだ見たことがない。それは、非常に複雑なプロセスなのである。

大きな課題の1つは、高い表面品質を維持しつつ、除去率を上げることである。これは主に熱管理の問題であり、使用できる平均出力が現在、一般的に50~100Wに制限されているのはその

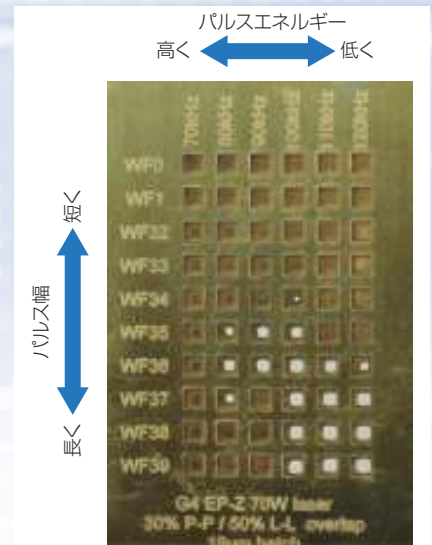


図3 パルスパラメータの効果を示す、真ちゅうのエングレービング見本。

ためである。この出力レベルでは、加工対象物に蓄積された熱によって、品質と一貫性の低下が生じ始める。印刷用ロールの上など、十分なバルク材料が存在する広い面積に対して、高い出力がうまく適用できる例もあるが、そうした例は限られている。

熱管理の問題は、熱負荷を分散させるためのさまざまな処理手法によって解決することができる。有望な走査ベースの手法として、インターレース走査がある。加工面のラインを飛ばして、後続のパスで飛ばしたラインを処理する方法である<sup>(1)</sup>。この方法(図4)では、100Wのレーザー源で処理を行った場合に、アルミニウムと真鍮に対して、材料除去率と表面粗さの両方を(連続走査と比較して)大きく改善できることが示されている。しかし、ステンレス

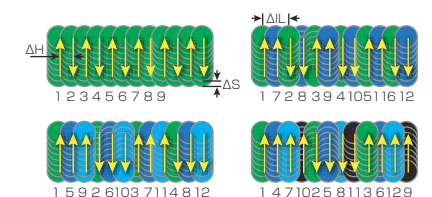


図4 インターレース手法。

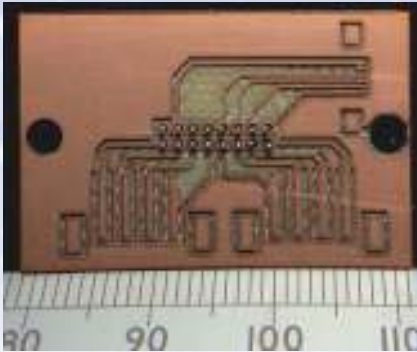


図5 ナノ秒レーザーによる銅除去を示す、プロトタイプPCB。(提供:英ニーダム・レーザー・テクノロジーズ社[Needham Laser Technologies])

銅に適用した場合は、表面粗さは改善されたが、除去率には何の改善も見られなかった。この手法は現在、200Wを使用するように改良されており、有望な結果が示されている。

銅も効果的にエングレービングすることができる。革新的な用途の1つが、プリント回路基板(PCB)の加工である。PCBは、従来は化学エッチングによって、複雑な導電経路が形成されていた。銅層は、一般的に40~100 $\mu$ mと比較的薄いが、金属層を選択的に除去してFR4基板を露出するエングレービングベースの手法によって、簡単に除去することができる。VINマーキングの例と同様に、パラメータの変更によって、露出したFR4基板から残余デブリを除去する、最後のクリーニング処理を行うことができる。さらに、薄板を所望のサイズに切断する処理にも、同じレーザーが使用できる。量産には理想的ではないかもしれないが、この手法は、PCBのラピッドプロトタイプングに採用されている(図5)。

### ほぼ無限に広がる、材料エングレービングの可能性

赤外線(IR)をある程度吸収する材料であれば、エングレービングが可能



図6 窒化アルミニウムの加工。



図7 超合金からの遮熱コーティングの選択的除去。(提供:英ウィンプロ・グループ・テクノロジーズ社[Winbro Group Technologies])

で、その範囲は無限である。エングレービングは、金属材料に限らず、セラミックや炭素繊維強化プラスチック(CRP)系材料にも適用できる。セラミックはもろい材料であるために難しく、亀裂が問題になる可能性があるが、窒化アルミニウム(AlN)など、適切に加工可能で優れた結果が得られる材料も存在する(図6)。レーザー加工に材料の硬さは関係なく、例えば、最も固い材料として知られるダイヤモンドでも加工できる。航空宇宙業界では、超合金製のタービンプレードにけられた冷却孔に水路を設けるための遮熱コーティングの選択的加工に、ナノ秒パルスレーザーが広く採用されている(図7)。

CRPには幅広い材料が含まれるが、CRPに対してもエングレービングで良好な結果を得ることができる。パルスパラメータを慎重に最適化することにより、強化繊維には触れることなく、母材の選択的除去ができる場合もある(図8)。

適切な加工手法を、MOPAナノ秒パルスファイバレーザーの多用途性と組み合わせることにより、任意のエングレービング加工において最良の結果を



図8 炭素繊維強化プラスチック(CRP)の選択的材料除去。

得るための最適化を簡単に行うことができる。

本稿が、ファイバレーザーのメリットと現代の製造におけるその重要な役割について理解するための洞察を示すことができたらうれしく思う。とはいうものの、本稿は、ファイバレーザーによるエングレービングが世界中のビジネスにもたらし得る、さまざまなメリットの表面をなぞったにすぎず、コスト削減の潜在的な側面について触れることさえしていないというのも事実である。ファイバレーザーによるエングレービングの詳細については、SPIレーザー社のウェブサイト [spilasers.com](http://spilasers.com) にある、エングレービング専用のセクションを参照してほしい。

#### 参考文献

- (1) S. Dondieu et al., "Investigation of laser beam scanning strategies for 100 W pulsed fiber laser engraving of metal," Proc. ICALEO(2019).

#### 著者紹介

ジャック・ガブジル(JACK GABZDYL)は、英SPIレーザー社(SPI Lasers)のマーケティング&ビジネス開発担当副社長。  
Email: [jack.gabzdy1@spilasers.com](mailto:jack.gabzdy1@spilasers.com)  
URL: [spilasers.com](http://spilasers.com)