新たな加工法の創出

Inovative Machining Process

志村 洋文

Hirofumi SHIMURA

◎1947年7月生まれ

1965年工業技術院機械試験所入所，現在工業技術院機械技術研究所基礎技術部トライボロジー研究室主任研究官

◎研究・専門テーマはトライボロジーおよびレザプロセッシング

◎工業技術院機械技術研究所（〒305 つくば市並木1-2）

はじめに

従来からの機械分野における「ものづくり」は材料に要求された形状を付与することが中心であり，そのため，生産性の向上および加工精度の追求が行われてきた。しかし，機械加工（特に旋削などの除去加工）の基本的な加工形態は近代機械加工技術が出現した産業革命以降ほとんど変化しておらず，この分野の近年の進歩は主として，NCなどの電子技術やセラミックス・サーメット工具などの材料技術によって支えられてきたと言っても過言ではない。これらの技術により，新たな難加工材料の加工に対する要求も乗り越えてきた。

この分野での機械の基礎的概念は，加工されるものの形状を設計寸法に近付けることを追求することである。従って，その研究対象は加工機の熱的・力学的耐変形性であり，工具と被加工材の加工されている位置の相対精度（precision）の追求であり，制御技術としては位置制御技術が取り上げられる。この技術は機械加工技術の中核を担うものとして今後も発展を続けることが要求されている。また，21世紀にはこの発展が機械加工のユーザである，材料や電子分野などに大きな影響を与えていくことを期待する。

その一方，加工精度が分子・原子レベルの最近の除去加工および付加加工においては，ハードな工具を用いないエネルギービーム加工に対する研究も盛んに行われている。エネルギービーム加工はその加工場の状態（温度，圧力，密度など）によってつくられる製品が決まる加工（生産）システムと考えられ，FDPS [Field Dependent Processing (Production) System] と名付けられるものであろう。従って，加工制御対象は従来の機械加工と異なり，加工場のエネルギー状態の制御が中心になる。この種の加工のツールとしては光，電子，イオン，プラズマなどが挙げ

られる。本稿はこの中でも特に最近注目されている光（フォトン，レーザ）を利用した加工を述べる。

フォトンマシニング (レーザ加工)

フォトンマシニングは光（フォトン）をツールとした加工場制御加工の代表例である。一般にはレーザを用いた加工であり，その波長は真空紫外の10数nm～遠赤外の数十 μm の範囲のものが使用できる。実験室レベルで利用できるものはエキシマレーザ（193nm），Nd：YAGレーザ（1.06 μm ），炭酸ガスレーザ（10.6 μm ）であり，その出力はkW以上である。レーザは光であるため，その性質（コヒーレンシー，偏光など）を十分に考慮して利用方法を考えなければならない。レーザをツールに利用することに対する歴史はハードなツールの歴史よりはるかに浅く，簡単のように考えられるが，その技術課題は山積しているのが現状である。

フォトンマシニングの概念には，現在のレーザ加工の中心である切断加工のような従来の位置制御加工の範囲にある技術も含まれる。レーザ溶接のように位置制御加工と加工場制御加工の中間に位置すると考えられるものやレーザによる材料創製や超微粒子・クラスタ作製など加工場制御加工であると言えるものもある。いずれにしても，加工場の制御はその目的を達成するために不可欠な因子であることは疑いない。

使用するツール（レーザ）の加工エネルギー密度は現在

でも $10^7\text{W}/\text{cm}^2$ を越えるため，この場の制御因子の範囲は極めて広く，温度では室温～数万度，密度では 10^{-5} ～数 g/cm^3 ，圧力では真空～数万気圧と考えられる。このような極端に広い範囲の加工場制御は今までに行われていない。また，ここでは光をツール（工具）として使用するが，これは光が物質にエネルギーを伝えるのに極めて有効な手段であると考えられるからである。また，従来の機械加工が機械力学，材料力学，熱力学，流体力学に立脚しているのに対してフォトンマシニングはより基本的な量子力学に立脚していると考えられる。なお，フォトンマシニングは①光がツール，②反力が極めて小さい加工，③超高エネルギー密度加工，④除去および付加加工が可能，⑤時間・空間，雰囲気が自由に選択可，⑥材料選択が自由，⑦遠隔制御性が大きい，⑧メンテナンスが簡易，⑨インプロセスモニタリング可能などの特徴をもっている。これらの概念と特徴から従来技術の問題点であった，反応時間の制御，加工雰囲気，元素選択，エネルギーの局所化などをすべて解決できる可能性がある加工である。

フォトンマシニングにおいてブレイクスルーしなければならない科学・技術面の課題は高密度フォトン（光）が物質に照射された場合におけるフォトンと物質との相互作用の解明であり，この解明には作用場の温度，密度，圧力の三次元的分布とその時間的変化を調べる光利用インプロセスモニタリング技術とこの作用場の変化過程の理論的モデルの構築が必要とされる。これに基づき，極めて高速で変化作用場の予測制御技術が確立され，フォトンマシニングの基本技術が開拓できる。

図1 レーザ溶接の概念図

フォトンマシニングの具体例

3-1

レーザ接合（溶接）技術^{(1)~(5)}

機械加工で製造されるさまざまな構造物の安全性、信頼性を高めるためには接合技術の高度化は重要な課題である。図1にレーザ溶接の概念図を示す。レーザ溶接は従来のアーク、プラズマ、電子ビーム溶接などと比べ加工雰囲気問わず高速に溶接できるなどの特徴を持ち、将来性が期待されている。しかし、現状のレーザ溶接では、深い溶け込みがえられず（深さ/幅が小さい）、例えばアルミニウム合金の場合には5 mm程度の厚板溶接が限界となり溶接部の信頼性が低いなどの問題があり、普及の大きな障害となっている。これはレーザが照射されて高温高压となっている溶接場の状態（温度、圧力、形状など）や現象が十分に把握できないためである。そこで、溶接場の状態を実時間で計測するインプロセスモニタリング技術とそれを用いた溶接場を制御するフィードフォワード制御技術を確立することが必要である。

これにより、厚板の溶接が可能になるとともに、溶接部の強度と品質の向上が実現できる。産業的には、輸送機器や大形構造物の安全性、信頼性が飛躍的に向上するとともに構造物全体の高剛性・高比強度により軽量化が行えるために大幅な省資源・省エネルギー効果が期待される。

3-2

レーザアシストガスデポジション^{(6)~(7)}

超微粒子（30 nm以下の粉、クラスタや分子を含む）を母材表面に吹き付け、被膜や細線をつくる技術をガスデポジションと言う。この時、レーザを照射し、超微粒子の焼結、相変態、反応を行わせるのがレーザアシストガスデポジションである。フォトン（レーザ）は質量が小さいので、ほかのエネルギービーム（電子ビーム、プラズマなど）と異なり、超微粒子を吹き飛ばさないことと、利用する雰囲気を問わないことに大きな特徴をもつ。なお、これは我が国オリジナル技術である。

現状の分子、クラスタ、超微粒子の作成では、材料の誘導加熱、アーク放電によるスパッタ、プラズマ加熱などを用いている。これらの方法ではルツボ材料からの不純物混入や分解するガスなどに含まれる元素は単一元素ではないため、単体の元素の超微粒子の作成が困難であったり、元素のストイキオメトリーを制御した材料や微小構造体の作成は困難な場合が多い。通常、これらの中で、アーク放電法が最も温度が上げられるため、小さい超微粒子や同素体

の作成ができる（炭素の同素体であるフラーレンは炭素を用いてこの方法で作成されている）。しかし、温度はせいぜい6 000~7 000°C程度で不十分であり、数nm以下の超微粒子の作成は困難である。また、アークは不安定であり、そのため粒径のそろった微粉の作成も容易ではない。なお、微粉の生成速度は遅く、通常の規模の装置で高融点の元素では数百g/day程度しか作成できない。

高出力レーザを材料表面の微小領域に集光し、照射点を超高温（1万度以上、場合によっては10万度）、超高压（1万気圧以上）の状態にすることにより、この領域の元素はバラバラとなり、プラズマとなる。それをガスで吹き飛ばすとプラズマは急冷、急減圧され、その過程で分子、クラスタ、超微粒子となる。この方法では今まで実現が困難であった金属の数nm以下の微粉の作成が行えることや導電性の小さいSi、Bなどの無機元素の同素体クラスタの作成が可能である。また、レーザのエネルギーによって作られるプラズマは安定化が可能であるため、粒径が極めてそろった超微粒子の作成が可能である。なお、微粉の生成速度は10 kg/day以上であり、ほかの方法に比べて100倍以上大きい。しかし、クラスタ、超微粒子もその被膜化、バルク化しなければ磨かれざる玉にすぎない。そこで、ガスデポジション技術が要求される。

作成された分子、クラスタ、超微粒子をノズルから吹き出すと同時に高出力レーザを照射し、微粉の焼結や雰囲気との反応による被膜、細線の作成ができる。これにより不純物を含まない被膜、細線が作成できる。この被膜はトライボロジー用途や電子デバイス用配線などに利用できる。また、レーザによる急加熱、急冷による相変態を利用し、準安定状態の材料や非化学量論的化合物の創製により、極めて耐摩耗性が大きな材料、電気抵抗の小さい材料並びに新たな半導体の作成が可能となる。さらに、高温状態では微粉は再度プラズマ状態となり、超急速加熱・急冷、急減圧過程を経て、新たな同素体を作成される。この状態の制御により現在注目されている規則性量子ドットの作成も可能である。これらは新たな機能材料として、今後の飛躍的発展が期待できる。また、方向性がない被膜でかつ1 μm以下の薄膜からmm以上の厚膜まで対応でき、被膜強度やめっき、CVD、PVDなどの被膜形成法に代わる技術である。この方法のもう一つの特徴は超微粒子をたい積、焼結し、新たな光造形が行える。従来のポリマーを使用する方法ではなく、金属およびセラミックスの超微粒子をダイレクトに使用することが可能である。超微粒子は焼結温度が極めて低く（20 nm程度のアルミニウムでは100°C程度である）、高出力のレーザを使用すれば極めて高速で三次元構造物の造形が可能である。また、超微粒子は1 μm以下の径のノズルからも噴出可能であるため、レーザのスポットと同程度のステップで造形できるため、極めて精密な

図 2 超微粒子製造の概念図

図 3 レーザアシストガスデポジションの概念図

形状が作成できる。

材料にフォトン（レーザー）が照射され、微粉などになる過程におけるプラズマとフォトンとの相互作用、超微粒子の光吸収などに不明な点が多く、この問題の解決なしでは作成過程の制御が行えず、レーザーアシストガスデポジション技術の完成は望めない。また、超微粒子の生成過程の把握、粒径制御技術、搬送技術、超微粒子の融合過程、超微粒子と母材の反応過程の解明など技術課題の解決も不可欠である。また、現状の高出力レーザーは光としての性質（コヒーレンシー）が悪く、微小領域に集光できない。最も良い高出力レーザーは炭酸ガスレーザーであり、コヒーレンシーの良いシングルモードレーザーで最大出力 4 kW 程度である

が発振効率 5% に満たない。コヒーレンシーの悪さ、出力不足、発振効率などの改善には新たなレーザーの出現が望まれている。現時点では LD 励起の完全固体レーザーが最も有望とされ、欧米各国も開発に力を注いでいる。これにより、レーザー発振器の小形化、フォトンコストの低減が行え、超微粒子などの価格の低減も図れる。なお、光の伝送、インプロセスモニタリングを行うための計測、制御についても研究の必要があることは言うまでもない。図 2, 3 にレーザーによる超微粒子製造の概念図とレーザーアシストガスデポジションの概念図を示す。

波及効果

4-1

接合技術

現在の接合（溶接）技術の中核をなすのはTIG, MIG等のアーク溶接技術である。この技術の歴史は古く、現在の産業には不可欠の技術である。しかし、さらなる高速化、高品位化については原理的に大きな問題をもっている。レーザ溶接技術により産業機器、輸送機器、発電設備、石油化学プラントの安全性、大形建造物などの高剛性化、安全性の向上、軽量化による省エネルギーが図れる。

高出力レーザ発振器の現在の国内の市場規模はせいぜい数百台/年であるが、アーク溶接機規模は10万台と言われている。この10%がレーザ溶接機に置き換わっただけでも、その市場規模は20倍に拡大する。従って溶接に最適なレーザ発振器の開発を真っ先に行うことが重要であろう。

4-2

レーザアシストガスデポジション技術

原子・分子オーダーの新たな機能の発現化が行えるなどの科学的・技術的波及効果ばかりではなく、新たな造形、トライボロジー、合金、セラミックス、電子デバイス、医薬品産業に以下のような社会的・産業的波及効果をもたらす。

(1) 三次元構造体作成（新光造形法）（金型、精密機械部品、マイクロセンサ・アクチュエータなど）

(2) 一般産業機械や輸送機器などの摺動部^{しゅうどうぶ}の超耐摩耗性被膜（精密案内面、バルブシート、ピストンリングなど）

(3) 発電設備の耐エロージョン・コロージョン被膜（蒸気タービン翼、ガスタービン翼、各種配管など）

(4) スーパーマテリアル（地球上では作成困難なPb-A1, W-A1合金、ブロンズ系セラミックスなど）

(5) マイクロ機能構造体（量子ドットなど）

(6) 超磁性材料、超伝導材料、半導体（強力モータ、スピーカ、太陽電池など）

(7) 電子デバイス（面発光素子、低電気抵抗配線）

(8) 医薬品、バイオ材料（抗ガン剤、人工骨など）

その結果、産業機械の耐久性、信頼性、安全性の向上が図れるばかりでなく、24時間形社会や急速に発展する情報化社会にも対応でき、また材料、電子、バイオ分野において、大きな技術革新となる新たな産業の創出が期待できる。

おわりに

フォトンマシニングを例として新たなエネルギー加工の展開について述べてきた。従来この分野はツール製造者が中心になって加工技術の研究、開発を進めてきている感が強い。従来の加工のツールと同様に加工技術の研究者が中心となって技術開発を行わないと、飛躍的な進展は望めないと考えている。そうすることにより、それぞれの分野に新たな産業を創出できるばかりでなく、ツール産業分野や材料産業分野の発展も同時に行える。このために新たな加工技術体系や概念の構築とその発展は、加工技術・研究者に課せられた使命であると確信する。

原子・分子レベルのミクロな加工は、今後の機械加工技術として重要である。現在、STM, AMFなどの微小なプローブ技術を用いた加工法が提案されているが、これらの方法を生産に利用することは困難であろう。フォトンマシニングはこれらの微少領域の加工において、近い将来生産に利用できる最も有望な加工技術であり、飛躍的な発展を期待するものである。

（原稿受付 1996年11月28日）

● 文 献 ●

- (1) 最先端レーザ加工技術, (1989), 75, (株) シーエムシー.
- (2) レーザプロセッシング, (1990), 213, 日経技術図書 (株).
- (3) レーザプロセス技術ハンドブック, (1992), 118, 朝倉書店.
- (4) 最新レーザ加工技術総覧, (1994), 74, (株) 産業技術サービスセンター.
- (5) 平成7年度先導研究報告書「フォトンテクノロジー」, (1996), 新エネルギー・産業技術総合開発機構.
- (6) 上田・ほか, 炭酸ガスレーザを熱源とするガス中蒸発法による固体超微粒子の作製, 豊田研究報告26報告, (1973-3), 66.
- (7) 小田・ほか, 超微粒子による新しい膜形成法, *Journal of SHM* (エレクトロニクス実装技術協会誌), 12-1 (1996), 30.