マイクロマシニングの研究と手法*

増沢隆久**

Research and Technology on Micromachining / 図
Takahisa MASUZAWA

Key words: micromachining, microtools, micro EDM, micropunching, micronozzle,
R & D

1. マイクロマシニングとは

この言葉は比較的最近使われるようになった。よくマイクロマシンと混同されることがあるが、意味は全く違う。マシニングは加工であり、マシンは機械であるから、日本語にするとマイクロマシニングが微細加工、マイクロマシンは微小機械となり、違いがよくわかる。つまり、マイクロマシニングは微細な領域に対して施す加工を意味しており、対象物の大きさや機能によらない技術分野である。

微細な領域に対しての加工は、いつからとは限定できないほど昔から行われている。縫針や釣針の先をとがらせる作業などは最も古くから行われた例と言えるであろう。従って微細な加工、もしくは微細加工という言葉も古くから使われていた。しかし多くの場合、特定の技術分野であるとは意識されていなかった。代わりに、時計、カメラ等の、微細な加工を駆使して製造される製品や、工作機械などの特に精度が重視されるものを対象とした技術分野として精密加工という言葉があり、これが微細加工を含めて技術分野を代表していた。ところが、世の中の軽薄短小の流れにより、1970年代後半あたりから、上のような特定の製品以外にさまざまな工業製品についても微細な加工が行われるようになり、これが一つの技術分野として精密加工一般とは区別して認識されるようになってきた。このためごく普通の表現である「微細加工」に代えて「マイクロ加

工」という言葉が使われるようになった¹⁾。微細とマイクロはもともと同様の意味を持つ（「微」も「マイクロ」も 10^{-6} を意味する）ので、単に英語をカタカナ表記で採用しただけであるが、これによって新たに技術分野としての意味が加味されたのは事実である。

このようにしてマイクロ加工が一定の地位を獲得したが、この分野はあらゆる種類の加工プロセスを含んでいる。その中でいわゆる半導体製造プロセスに用いられる加工技術、例えばリソグラフィやエッチングの技術はLSIの普及と共に飛躍的な発展をとげ、それだけで一つの技術分野と見なせるほどになってしまった。一方で、工作機械による微細加工技術も着実に進歩し、上記エッチング等と並び一つの技術分野を形成しつつある。このような状況から、マイクロ加工のうち機械加工的なものをプロセス的なものと区別してマイクロマシニングと呼ぶようになった。もっとも、「マシニング」を日本語にすると通常は「加工」になってしまうこともあって、マイクロ加工と同義で使われる傾向もある。また、加工現象そのものにもプロセス的、機械加工的と明確に区分できないものがあったり、これを複合した加工法などもあるので、境界はもともと明りょうではない。しかし、このような経緯から、ここでは一応工具を用いて形状を生成していくようなタイプの微細加工をマイクロマシニングと呼ぶことにする。

2. 最近のマイクロマシニング

マイクロマシニングの技術的發展においては、微細限界、形状精度、加工対象（材料）などにおけるブレークスルーがまず求められる。この点で、新しい加工法の開発が重要な意味を持ち、歴史的に、新しい加工法が出てくることによってより微細な、より高精度な加工が、より多くの

* 原稿受付 平成5年10月14日
** 正会員 東京大学生産技術研究所（東京都港区六本木7-22-1）
東京大学大学院工学系研究科博士課程修了、工博。各種の加工法によるマイクロ加工技術の開発、特殊加工の精密加工への応用、微細形状測定法の開発など。著書：「マイクロ加工技術」「精密工作便覧」など（部分執筆）

表1 マイクロ加工の諸手法
(工具を用いるもの)

固体工具	像工具
切削	レーザ加工 電子ビーム加工 イオンビーム加工 ^[2] など
研削	
エンドミル加工	
EDM	
ECM	
打抜き	
プレス	
インジェクション	電铸 ^[1] など
電铸 ^[1]	
など	

- [1] モールドまたはコアを用いるもの
[2] 集束イオンビーム

図1 WEDGの加工原理

材料に対して行えるようになってきた。

マイクロマシニングに適用される加工法の代表的なものを表1に示す。表中、かなりの部分が比較的新しい加工法であることが分かるが、いずれも加工原理により新たなブレークスルーを提供する段階はすでに終わり、それぞれの技術内容、適用形態の更新によるレベルアップ、あるいは工業化へのプロセス再構築、つまり再現性、生産性等を重視した技術向上を追求する段階に入っている。

これらの加工法のうち、ここ10年で著しい発展をしたのがEDM（放電加工）である。これについてその発展の経緯の一端を紹介する。

3. マイクロEDM

EDMは工具電極を用いて、微細な放電により被加工材料を少しずつ除去して形状生成を行う加工法である。実験室的には既に25年以上前に直径数 μm の穴加工に成功する²⁾³⁾など、その素質が注目されたが、工具電極の製作、取付けなどが難しく工業的応用が進まなかった。しかし、1984年になって、新しい放電加工の応用形態としてワイヤ放電研削法（WEDG, wire electrodischarge grinding）が開発された^{4)~6)}。これは図1に示すように、ワイヤガイドに沿ってゆっくり移動する金属細線（ワイヤ）を電極として、放電により細い棒を成形する手法である。（砥粒は

図2 WEDGおよびEDMを適用したマイクロ打抜きシステム

用いないので、加工現象としては普通のEDMと同じである。）

この方法によると、加工力を加えずに、また工具であるワイヤの消耗の影響なしに加工が行えるので、非常に細い軸が精度良く加工できる。つまり、軸加工のマイクロマシニングにおける革新的な技術となった。

軸加工における技術革新はマイクロマシニングの他の分野に波及効果を及ぼすことになる。すなわち、これにより種々のマイクロマシニング用の加工工具の作成が容易になるからである。

最も直接的なものは、マイクロEDMの工具電極製造への適用である。WEDGはもともとEDMの一形態であるから、これにより製作した軸を工具電極として、同一装置上で穴加工等のマイクロマシニングを行うことができる。この際、工具電極はWEDGにより製作された後、付け替え（再チャッキング）の必要がないので、工業化するうえでのネックの一つであった工具電極取付精度の問題も同時に解消された。WEDGの開発により、EDMによる直径数 μm の細軸、および細穴の加工が同時に工業化可能となったのである。

4. WEDGの波及効果

細軸の加工技術の進歩は各種工具の製造技術に直接的に反映される。WEDGの開発により、いくつかのマイクロマシニングの手法にも新しい発展の道がひらかれた。

一例としてマイクロ打抜きが挙げられる。図2はWEDGとマイクロEDMをパンチ及びダイの製作に適用し、ダイセット製作から打抜きまでを全自動プロセスとして、 ϕ 数十 μm の打抜きに適用可能とした例である⁷⁾⁸⁾。従来の方法ではダイセット作成に数十日の時間と熟練した組立技術を要したが、この方法によれば工具電極作成とパンチへの再成形がWEDGにより簡単に行えるうえ、工具（電極、パンチ共用）の付け替えがないので均一なクリア

図3 マイクロノズル作成プロセス

ランスを持つダイセットが1時間ほどで自動的に構成できる。また、摩耗したパンチの再研磨も同一機上で簡単に(数分で)行えることになる。

その他、マイクロドリルの作成においても、従来難しかったダイヤモンドコンパクトを素材とするものが製作できるようになった。また、マイクロエンドミルへの適用も同様に可能となった。

5. 複合的なプロセスへの適用

WEDGを微細な芯型の作成に応用すると、図3のような複合プロセスにより、マイクロノズルの作成を行うことができる。ノズル外形の加工にもWEDGが適用されているが、WEDG、ワイヤ電解研削(WECG, wire electrochemical grinding)、電鋳の3手法の結合により、偏心のない、種々の形状(内側、外側とも)を持つノズルが自動的に作成できることとなった⁹⁾¹⁰⁾。

6. WEDGとその応用開発に見る傾向

WEDGの開発はなぜ成功したか。その最も重要なポイントは、開発者が長年微細電極の製作に苦しんできたことである。細線を引き伸ばし、真直化し、取り付け、傾き調整をし、それでも正確な工具設定が得られる確率は充分高くなかった。これを解決するには全く新しい手法を開発するしかなく、それについて数えきれないほどの案が浮かんで消えた。そして、またこれもダメだろうが、しかし、ということで試してみた一つがうまくいったものである。

加工関係の技術は、現象が複雑で、パラメータが多す

ぎ、計算や経験で予測して何かをやってみても予想が外れる確率が高い。逆に言えば、不成功を予測して、やらないという決定を下すと、思わぬ大魚を逃す確率も高い。もちろん、経費も時間もマンパワーも常に限られているわけであるから、すべてを試してみるわけにはいかないが、常日ごろいくつもの案を考え、それらのうち、有望なものを選び、原理的に明らかに不可能であると判明したもののみ除いて、あとは試してみる。このようなアプローチが成功に結びつく一つの典型となる。WEDGはこのようにして成功した。

WEDGの開発は波及効果が大きかったといえよう。それはなぜか。筆者の独断によれば、それは成果が単純であったからである。従来の水準を大きく越え、なおかつ単純な成果である場合には、波及効果が大きい傾向がある。WEDGの場合、従来作れなかったような「細い金属軸」が作れる、という単純な成果であり、従って細い軸を必要とするすべての分野にその影響が及ぶことになる。これが「〇〇が××である場合の△△に用いるための、□□を素材とする▽▽」を作成する方法を開発したとしたらその波及効果は限定されたものとなるであろう。WEDGのような単純な成果を挙げるような研究は、一見応用研究のようでも、ある意味では工学における基礎研究の典型的なもののひとつではないだろうか。

どうせだめだろうがやってみたら大成功、というパターンは、ラッキーであったということを意味するが、前段においてそのテーマで十分苦勞することが、ラッキーな方向へと導く重要な役割を果すのではないだろうか。

参 考 文 献

- 1) マイクロ加工技術編集委員会(編): マイクロ加工技術, 日刊工業新聞社, (1977).
- 2) 倉藤尚雄, 増沢隆久: 超硬合金の放電微小孔加工, 昭和42年度精機学会秋季大会学術講演会前刷(1967) 77.
- 3) 倉藤尚雄, 増沢隆久: 超硬合金の放電による微細加工, 電気加工学会誌, 2, 3 (1968) 1.
- 4) 増沢隆久, 藤野正俊, 小林一也: マイクロ放電加工の高精度化(第1報)——走行ワイヤによる自動電極成形, 昭和59年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1984) 359.
- 5) T. Masuzawa, M. Fujino, K. Kobayashi and T. Suzuki: Wire Electro-Discharge Grinding for Micro-Machining, Ann. CIRP, 34, 1, (1985) 431.
- 6) 増沢隆久, 藤野正俊: 高精度微細軸加工の研究(第1報)——ワイヤ放電研削法の開発, 電気加工学会誌, 24, 48 (1991) 14.
- 7) 山本正樹, 増沢隆久, 藤野正俊: ワイヤ放電研削を利用したマイクロ打抜き加工, 昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1986) 721.
- 8) 山本正樹, 吉田輝夫, 増沢隆久, 藤野正俊: ワイヤ放電研削を利用したマイクロ打抜き加工(第1報), 昭和62年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1987) 735.
- 9) C.-L. Kuo and T. Masuzawa: A Micropipe Fabrication Process, Proc. MEMS '91, IEEE, (1991) 80.
- 10) C.-L. Kuo, T. Masuzawa and M. Fujino: High-Precision Micro-nozzle Fabrication, Proc. MEMS '92, IEEE, (1992) 116.