

セッション 1

「三次元マイクロ加工技術」

増沢 隆久 (東京大学生産技術研究所)

マイクロメカトロニクス国際研究センター 教授)

それでは、これから「三次元マイクロ加工技術」についてお話ししたいと思います。

(OHP)

最初に、簡単な三次元マイクロ加工の概略と、いくつかの技術について、マイクロ放電加工、マイクロ超音波加工、マイクロレーザ加工、最近技術の進歩の著しい3つの技術をご紹介します。そのほかにもたくさんあるわけですが、時間の都合でこれだけ今回はご紹介します。

(OHP)

まず、マイクロ加工、非常に小さな寸法の加工をすることなんです。どうやればマイクロ加工ができるのかということです。これには基本的に2つの必要なことがあります。一つは、加工精度が高いということが必要、もう一つは、少しずつ加工するということが必要、この2つが必要条件です。

これはどういうことかといいますと、例えば同じ5ミクロンの精度で丸い穴を加工しますと、直径1mmならこのように加工でき、直径100ミクロンならこんなになる。10ミクロンの穴なら加工したらこんなになってしまう。これは丸穴ではない、こういうことになります。ですから小さくてもきちんとした形を加工したければ精度をだんだん上げていかなければいけない、こういうことです。

もう一つは、少しずつ加工しないとうまくない。例えば、放電加工というのは、放電で少しずつ材料を取り除いていきますが、1回で5ミクロンぐらいつ取るという条件に設定して、直径1mmの棒を加工するとこんなになる。直径100ミクロンの棒を加工すると、こんなにぼこぼこになってくる。直径10ミクロンだと棒だか何だかよくわからないということになる。これを直径10ミクロンで、なおかつ棒にしたければ、こんなにたくさん1回にぼこぼこっと取ったんではだめだ、少しずつ取る必要がある、こういうことです。この2つの条件を満足させれば、基本的にはマイクロ加工はできます。

(OHP)

ではどういう方法でマイクロ加工が実際にできるのかというと、現存するほとんどの加工法でマイクロ加工が可能です。そのうちでも主なものを表にしてみました。いくつかのタイプがあります。一つは、型を使って加工するというのがあります。射出成形、コイニング、電鑄、鑄造、こういったのは目的とする形を金型等の型でつくっておいて、その形をいきなり材料にコピーしてしまうわけです。こういうタイプのものがあります。それから、工具を使ってその工具を動かしながらだんだん加工していく、こういう方法があります。それからマスクを使って二次元形状を決めておいて、それに従って加工する、こういったタイプのものがあります。

この中で、型を使うというのは、もうできている型の形をそのままコピーしますので、先ほどの2つの条件とは関係ない方法で、少しずつもへったくれもない、いきなりできてしまう。精度は、型のほうで決まっていますから、それがコピーされるだけです。ということでちょっと例外的なんです。実はこれのときは型をつくらなければいけないので、型をつくる時に先ほどの条件が必要になります。

それから、「マスクと処理時間で行う」というのは、先ほど藤田先生のお話にあったようなフォトエッチングの手法が代表的なものです。このタイプのものは、マスクで決める形は大体二次元的な形状なので、比較的平たいものに向いている加工法です。

「型」というのは、決まった形のコピーをつくるだけ、こちら(マスク+処理時間)は平たい二次元形状を延長していく、こういうタイプなんです。工具と運動軌跡で加工するものは、「型」に比べると形を自由に決めていける。こちら(マスク+処理時間)のに比べると三次元形状が確実に指定できていく、こういう特徴がありまして、複雑な形をつくるにはこのグループ(工具+運動軌跡)が非常に適しているということになります。

ここにありますように、放電加工、切削、研削、超音波、電解、レーザ、イオンビーム、電子ビーム、そのほかにもたくさんあります。これらそれぞれのマイクロ加工という

のが存在します。このなかで今日は、放電加工と超音波加工とレーザ加工についてご紹介したいと思います。

(OHP)

最初に放電加工。放電加工のことを EDM といいます。

放電加工は金型等に関係されている方はよくご存じと思うのですが、絶縁液の両側の金属に電圧をかけますと、ここで放電が生じる。その熱で材料が溶けて、ガス圧等によって吹き飛ばされる。こういう除去原理に基づいています。

それで、片方を電極、工具として、もう片方が加工する相手だとすると、こういうところで放電が起きて除去されてきますので、送り込んでいきますと、こちらの電極の形と同じような反転した形が加工できる、これが基本的な加工の原理です。

(OHP)

この加工法を微細加工に応用したのは昔からありました。応用というか、加工できることはわかっています、例えば 20 ミクロンぐらいの穴を加工したというのは、1960 年代に既に例があります。しかしなかなか実用化されなかったのは、加工するための工具の電極をつくるのが結構難しかった。それに対して工具をつくる技術が、1980 年ごろ初めて開発されました。これから急速に実用的な加工法になってきたということです。

(OHP)

この細い工具等をつくるのには、ワイヤ放電研削法 (WEDG) という方法が使われまして、この方法が非常に強力で、こういうワイヤを電極としてこの材料を非常に細い形状に加工していく方法です。

(OHP)

例えば加工例としてはこんなピンがあるのですが、直径 5 ミクロン、こういうタンゲステン製のピンですが、こんなものが自動的につくれるという方法です。

(OHP)

もちろんこんな単純なピンだけではなくて、いろいろな形を NC 制御を使ってやりますと加工できます。こういったいろいろな形のものができますので、こうしてつくったものを工具として放電加工を行えば、またさらに複雑な形状の加工ができるというわけです。

(OHP)

放電加工は、刃物で削るのとは違っていて、工具を動かしますとその方向に、どんな方向に動かしてもそっちの方向に削れていくということで、かなりいろんな形状の加工の仕方があります。このように単純に穴をまず加工する。これは真っ直ぐ送ればいいわけです。こういう少し形をつくってある電極を使えば、その形でキャビティがほれていく。あるいは単純な電極であっても、それを適当に動かしてやれば、その形にキャビティが掘れていく。それから、

棒を削ることもできるし、ピンをつくることもできるし、例えば、こういう四角い棒のようなものでもつくれるのが放電加工です。

(OHP)

実際の加工の例、単純なもので穴加工といえば、先ほど言いました直径 5 ミクロンの穴、こういうものがきちんと加工できるわけです。こういう穴加工機というのは既に市販機が出ておまして、実際に工業的に応用することができますようになっていきます。

(OHP)

最近の技術は、これをもう少し複雑な形状の加工に応用するというので、単純なピン状の電極を使いまして、それをこういうぐあいに動かしてやる。少しずつ削ってやってやりますと、例えばこういう深いキャビティでも加工することができます。

放電加工では、この工具の電極がわりと早く減るわけですが、このような加工の仕方をしますと、減るのが、長さ方向だけに減るということになりまして、あとでこの長さ分だけ、加工する深さのほうを見掛け上余分に加工してやる。こういうことをしてやりさえすれば、目的どおりの深さまで加工することができるわけです。これは、ただ真っ直ぐな窪みをほるというのではなくても、それが斜めに、つまり深さによって寸法が変わっていくような形状でも NC の制御によって加工することができるわけです。

(OHP)

例えばこのようにだんだん深くなるに従って狭くなるようなキャビティ、こういったものが先ほどの技術で加工することができます。

(OHP)

もう少しおもしろそうな形ということで、こんな加工もしてみたわけですが、これはご覧のように自動車の形です。こういう金型をつくってみようということで、寸法がセンチメートルではなくてミクロンです。ですからこの車は、長さが 500 ミクロンしかないという車で、これをいくつかの部分に加工手順を分けまして、実際に放電加工で加工しております。

(OHP)

これができあがった金型、こういう自動車の形にちゃんと加工ができております。いくつかの工具の電極をつくりかえながら、3種類使っていますが、そういうものの組み合わせでこれを NC 制御によってつくり上げたというものです。

(OHP)

金型をつくるだけではつまらないから、その中にプラスチックを注入いたしますと、このようなプラスチックの自動車をつくることができます。肉眼で見ると、ゴマ粒に比べるとはるかに小さいものですから、ほとんど見えませ

ん。

ということで放電加工技術は、こういったレベル、5ミクロンの穴が加工できます。数百ミクロンの複雑な三次元形状が加工できます、こういうレベルにきております。

(OHP)

次にご紹介するのが超音波加工、USM (ウルトラ・ソニック・マシニング) です。超音波加工というのは、今度は砥粒を使った研摩に似た加工法です。

(OHP)

加工原理はこのようになっております。工具が振動しています。これは超音波周波数で振動するので「超音波加工」というわけです。ここに砥粒に水を混ぜたドロツとしたスラリーを入れてやります。ここに砥粒が入っています。この上下の運動によってこの砥粒が打たれて、工作物のほうの表面を叩く。これによって少し砕いて取り除いていく、こういう加工です。叩いて、砕いて取るということで、この加工法はガラスとかセラミックとか、硬いけど脆い材料、こういうものを加工するのに向いています。電気が通る通らないは関係ないので、先ほどの放電加工は電気を通して加工するので、金属とか合金に適していますが、この方法は硬くて (もちろん硬くなくてもいいですが) 脆い材料の加工に向いている加工法です。

ただ、この加工法は、超音波振動をかけるので、工具を取り付けても落ちてしまうとか、問題が大きい。そういうわけで、なかなか工具を精度よくつくって取りつけることができなくて、微細加工には使われてなかったんです。

(OHP)

そこでいくつかやり方を考えまして使えるようにしたのがわれわれの成果なんですけれども、普通はこういうぐあいに加工する、工具の取り付け製作に問題がある。

そこで、工具の材料を先にここにハンダ付け等で付けてしまっ、それをこの機械の上で成形する。こういうふうにしてやりますと、出来上がったときに、この工具は真っ直ぐ取りついてますし、また WEDG でやれば、非常に細いものをつくれるということで、精度よくできておりますので、これで加工ができる。これで直径 20 ミクロンぐらいの穴の加工ができるようになっております。

ただこの場合は、ここがかなり複雑。超音波振動を与え、なおかつ回転もしなければいけないし、放電のための電源の接続とか駆動のための電源の接続と大変複雑になっておりますので、こここのメカニズムの精度をなかなか高くできない。そこで次のバージョン 3 になってきて、どうしたかといいますと、もうこれを振動させるのはやめようということで、振動するのは工作物にする。そうすると、ここが振動しなくなったおかげでシンプルになりまして、普通の工作機械、切削用の工作機械とか放電加工みたいな非常に精度の高い工具のシステムを使えることになった。それで、

こちらの工作物はただ振動だけすればいいということで、こっちの加振のメカニズムも簡単でいいということになりまして、全体的な精度は飛躍的にアップします。そこでこれになって直径 5 ミクロンの穴加工ができるようになっております。先ほどの放電加工と同じぐらいのレベルに到達している。

(OHP)

実際の穴。これは石英ガラスに加工した直径 5 ミクロンの穴ですが、これが超音波加工で加工しているわけです。もちろん砥粒は非常に細かいものを使わないとだめです。普通の超音波加工機で使用しているような砥粒を使うと、砥粒の大きさがこの穴径よりでかいですから全然だめです。この場合は直径 0.25 ミクロンというダイヤモンド砥粒を使っております。

(OHP)

もちろん単純に穴だけではなくて、先ほどの放電加工と同じように、工具を使って加工する方法ですから、似たような面がありまして、こうやって動かしてやれば、工具とは違う形をつくることもできます。

ただ、この場合問題なのは、放電加工のときよりもっと問題なのが、この工具が減りやすいということ。例えば先ほどの例だと、砥粒はダイヤモンドの砥粒を使っています。それを振動で叩くということは、力は相互に働いてしまうわけですから、工具のほうもダイヤモンドで加工される。どんなタイプの工具を持ってきたって、やはりどんどん加工されてしまうわけです。そういうわけで、加工していくとだんだん工具が短くなっていくので、しかも非常に細い工具を使っていたら、あまり長くできない。あまり細長いと超音波振動が影響して横に動いてしまうとか折れてしまうとか、起きます。力がかかります。それで、工具が減るというのは非常に大きな問題ですが、これには一つ手があります。

(OHP)

それはダイヤモンドに負けない材料を使うということ、それは何かというとダイヤモンド、つまりダイヤモンドの工具を使えばいいわけです。普通のダイヤモンドを工具に加工するのは大変なんです、焼結ダイヤというのがあります。ダイヤモンドパウダーを焼結してつくった材料です。これですと放電加工ができます。焼結ダイヤモンドを使えば工具ができまして、通常使っていたタングステンカーバイド、超合金のツールですと、加工した量 1 に対して消耗する長さが 0.74 というところでもない消耗をしましたが、この焼結ダイヤを使えばほとんど減らないということになります。というわけで、これは十分工具として長持ちするというわけです。

(OHP)

こういうふうな工具を使ってやりますと、例えばこんな

深さのある穴(ただの穴でおもしろくもなんともないとお思いでしょうが), この場合直径が20ミクロンぐらいですが, 深さ150ミクロン. こういう深い穴を加工できます. しかもこうやっていくつも加工することができるわけです.

(OHP)

もちろん溝の加工でも工具の丈夫さは威力を発揮するわけで, 例えばこんなガラスに幅7.7ミクロン, 深さ18ミクロンの溝を, 数十ミクロンにわたって掘る, こういったようなことができるようになります.

というわけで超音波加工, レベルとしては5ミクロンのレベルまで到達していますし, もちろんいろんな複雑形状を加工することもできます.

(OHP)

これはマイクロタービンのチェンバーですけども, これが300ミクロンということ, こういう複雑な形, これを超音波加工で加工した例です. この加工はバージョン2の装置でやったものですから, あまり精度よくできていませんけれども, 基本的にはこういうものができますということです.

(OHP)

次に, レーザ加工, LBM(レーザ・ビーム・マシニング), この言葉も今国際的には通用するようになってきつつあります.

レーザ加工といいますと, 通常工場で見にするのは炭酸ガスレーザ, あるいはYAGレーザということになります. これが一番普及していますが, これらのレーザは, 加工するのに相手の材料を加熱して蒸発あるいは溶かして取る, こういうタイプの加工です. これですと, どうしても加工領域を非常に小さく限定するのが難しいということがあります. つまり熱伝導で周りにどうしても熱が伝わりまして, 周りが絶対影響を受けてしまう.

(OHP)

それに対して最近登場してきましたエキシマレーザというのがあります. エキシマレーザは, 同じレーザでも光の波長が非常に短いということで, 熱で溶かすのではなくて, 光子, フォトンといいます, 光を粒子とみなしたときのその粒子の持っているエネルギーが非常に大きいものですから, そいつがぶつかりますと材料の原子の結合がいきなりそれで解き放されてしまう. つまり固体だった材料がいきなりばらばらの原子, つまり気体のような状態になる. そういう形で加工するものですから, 熱は基本的に発生しない. 少し発生しますが, ロスによって, でも基本的に熱で加工するのではないということで, 光が当たったところが取れる, ほかのところは関係ない. こういう加工法です.

そういうわけで, もしその光を非常に限定したところに

当てることができれば, マイクロ加工ができるようになるわけです.

(OHP)

一般的なエキシマレーザ加工の装置はこんなふうになっていまして, これはレーザ発振器. ここで波長の短い光を発生させる. ミラーで向きを変えまして, 途中でマスク(mask)というのがあります. これはマスクを使う加工法にも属すると言えるかもしれませんが, このマスクにあるパターンが, これは光ですから, ここを通過して出ますと, それをレンズで焦点を結んでやれば, この焦点位置の材料の上にこれと同じパターンをつくることのできる. もちろんそのときに, この寸法を小さくすることもできるわけです. これは像ですから, 光学系を考えれば, これより小さい像をここに結ばすことのできる.

ということは, そういうパターンで光が当たる. その光の当たったところがいきなりぱっと消えてなくなる, こういう加工ですから, このマスクのパターンが工作物の上に直接掘り込めるという加工法です.

(OHP)

例えばこんなふう, これは加工した工作物の写真ですが, マスクにこういう形の絵を切っておけば, そこを通った光が来て当たりますので, こういう形が加工できる, こういうことになります. この加工の深さは, どれだけの時間レーザ光を当てたか, これでどんどん深くなっていくわけ. そういうところがフォトンによる直接原子を除去する加工法であるという利点であります. そういうことがあるので, 三次元的な加工が可能になってくるということになります.

(OHP)

これはまたもう一つ, 二次元的ですが, こういうふう穴をいくつも加工する場合に, 普通は次々穴を加工していくのですが, エキシマレーザの場合ですと, こういうパターンで穴のあいてるマスクを使ってやりますと, いきなりそれと同じパターンでたくさんの穴がいつべんに加工されてしまう, こういう加工です. ですから, 穴のほうはアレンジメントを決めてやれば, そういうマスクを持ってくれば, どこでもすぐこのパターンで穴が整列して加工できるということになります.

(OHP)

そしてそのビームを細いビームにしておいて, これでスキャンする. 場所によって照射時間を変える. こういうことをしてやりますと, こういうぐあいに場所によって深さの違う加工ができるようになる. ですから, これをこういうぐあいにスキャンしながら, ここでは長く照射して, ここでは照射を減らすということをやればよいわけです.

これは実はドイツのハノーバーのほうで研究されたもの

ですけれども、単純にそうやってスキャンしながら、小さなポイントで加工していきますと、ものすごく時間がかかるわけです。そこでざっとある範囲をたくさんとってしまいたいときは、マスクを広げて、穴を広げて、また細くしぼらなければいけないところだけマスクを、穴を小さくしてやる。こういう複雑なコントロールをしています。しかし、いずれにせよこういう加工が可能であるということです。

(OHP)

ここで、エキシマレーザの特徴についてまとめると、利点は、さっき言いましたように、熱を使わないので、熱影響がほとんどないということと、加工が照射時間に比例して進んでいくということで、三次元形状の加工に適しているということ。ただ問題点としては、さっき言いましたようにスピードがどうしても遅い。原子を1個ずつとってきます。しかも、スポットにした場合は大部分のレーザを使わないで、ほんの一部だけをフォーカスして使うことになる。それから、さっき言いました複雑な制御が必要であるということで、マスクのオープニングを変えとか、テーブルをコントロールして、スピードを変えとか、複雑です。こういうことがありますので、実はこの点に関して、これを何とかしないと、実際に実用的な製品を加工したりするのはなかなか難しい面があります。

(OHP)

そこで、ごく最近なんですけど、オランダのTwente大学と共同でエキシマレーザに関する研究を行ったわけでして、その目的は、もっと速く、簡単に、三次元形状の加工をできるようにしようということで、開発した方法が、ホール・エリア・モジュレーション、省略してHAMと呼んでいます。HAMという手法を開発しました。

これはどういうのかと言いますと、例えばこういうマスクを使って、穴がいっぱいあいています。これでレーザを照射しますと、穴がたくさん同時に加工できるわけです。ですが、そのときにも、この工作物、あるいはマスク、どちらでもいいのですが、こういうふうに動かしてやる。縦、横、斜め、どうでもいいのですが、とにかく均一になるように動かしてやりますと、この穴と穴のイメージが混ざり合ってしまうわけです。穴の全然ないところは加工されませんから、ここの部分に相当する、こういうキャビティがほれるということになります。これは全部同じ大きさの穴があいていますが、もし穴の大きさを変えてやると、大きな穴のところはトータルとしてたくさん、小さい穴のところは浅い穴があくということになる。つまり穴の大きさで深さを決められる。

制御のほうは簡単です。ただこうやって均一になるように動かすだけなので非常に簡単な制御で、深さは穴の大き

さで決めてやる、これで三次元形状の加工ができるはずだということです。これは単純な形ですが、実際にそういうことができるかどうかというのをエキシマレーザで加工して、テストをしております。

(OHP)

使ったマスクはこういった大きさ、これはまだあまりマイクロではないのですが、500ミクロンピッチで、大きな穴が400ミクロン、小さい穴が200ミクロン、こういうマスクをつくりまして、これは全体で5mm×10mmぐらいありますが、これはレンズ系を使って縮小投射します。したがって、実際にはこれの6分の1ぐらいのスケールのもので加工できるということで、やってみると、そういう深さの違う部分のある一つのキャビティを加工することができております。

(OHP)

こちらが小さい穴があいていた部分に相当するところ、こちらが大きい穴があいていた部分に相当するところですが、これだと四角いメッシュみたいなものが見えるのですが、ほんのわずかな深さの違いの、テーブルの動きの影響が出ておまして、そういうふうに見えますが、実際にはそれほど大きな凹凸があるわけではなくて、

(OHP)

こういうぐあいに、これは断面の測定結果なんけれども、深いところ、浅いところ、こういう形でちょうどマスクにあいている穴の面積に比例するような深さで、深さの違いが加工できているということになります。この加工は、全体にわたってレーザビームを利用しているので、加工のスピードが速い。これをスキャンしていると、スキャンしているだけでも時間がかかるのですが、同時に加工しますので、これを加工するのに大体4.5秒、あっという間にできてしまう。それくらい速いということで、こういう単純な段差ではどうしようもありませんが、例えば皆さんの顔の凹凸のデータを取り込みまして、それを穴の大きさに変えたマスクをつくる。それを照射してやりますと、ちょうどそのマスクと同じ形のへっこみ(でっぱり)をつくれる。それを身分証明書の中に掘り込んでおけば、本人とすぐ確認できる、こんなのも可能ではないかと思えます。

以上、ごく限られた手法だけについてご紹介しましたが、こういったどちらかという従来技術をマイクロのほうに延長したというような形の研究をうちの研究室ではやっています。こちらのほうははっきりした予測需要に引っぱられている半導体技術と違って、寝ているとちょっと進展しないという領域で、仕方がないので私が起きて一生懸命引っ張っているというところがございます。

どうもご清聴ありがとうございました。

(了)