

## 「マイクロ加工—機械系からのアプローチ—」

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)

おはようございます。地球の温暖化を肌で感じるような日になってきましたけれども、温暖化を阻止するために、なるべく薄着をして、エアコンをなるべく切るというのが効果があると思われます。というわけで「上着を着ない会」というのを作りまして活動しておりますので、失礼とは思いますが、上着なしで講演させていただきたいと思います。今のところ会員は私一人なんですけど(笑)。今日は、マイクロ加工のお話をさせていただきます。

マイクロ加工というのは非常に小さなものを加工する技術のことでございます。

(OHP)

非常に小さなものというのはいったいどういうものかという説明は簡単ではないのですが、例えば、ここにあげたようないろいろなものがありますが、こういったものはマイクロ加工の技術を使って生産されております。いろいろな部品あるいは製品。

これは部品そのものは非常に小さい寸法になっているということでマイクロ加工が必要。それから下のほうにきますと、我々の身近に使っております工業製品、こういったものはその中の重要な部分として非常に微細なものが使われている。したがってそれらをつくるにはマイクロ加工の技術が必要となっているということでございます。将来的には、ここへあげたのは現在存在しているといえますか、つくられているものですが、現在つくられてないようなものまでマイクロ加工の技術の進歩によってつくられるのではないかと考えられます。

例えば、マイクロエアコンなどというものができると、直径1cmのエアコンとか、そんなのができてくる。そうしますと、例えば帽子にそれを100個ぐらいセットいたしまして、帽子のつばは太陽電池にする。そうしますと、この帽子を被って夏、外を歩いてますと頭が非常に涼しいということになるわけです。こういう帽子はたぶん今から、私の期待するところでは32年後にこれが発売になる。そうしますと、ちょうど私の米寿の祝いにこの帽子がいただける、ということでございます。

これは夢のような話ですが、しかし技術はそういう方向に向かって着実に進んでおります。そこで今日は、それらの微細なものを加工する技術の基礎的な部分、なかでも機械系で従来扱ってきた加工方法による加工法、こういったものの現状を紹介したいと思います。

(OHP)

話の内容はだいたいこんなふうになっておりまして、最初に、マクロ加工の総論的なこと、次にマイクロ加工に非常に適した加工群であります電気的な加工群のいくつかについて、それから機械的な加工群、もし時間があれば、こういったミクロな製品の形状を測定する手法について若干ご紹介したいと思います。

(OHP)

マイクロ加工というと、非常に威儀を正してしまうわけですが、要は、非常に小さなものを加工するのだということです。そのためには加工技術としては二つの必要な条件があります。一つは、加工の精度が高いことです。加工した寸法の誤差が大きいと、小さなものの加工は正確にできないということで、何となくすぐわかりますけれども、例えば加工の誤差が5ミクロンとなっているとしますと、直径1mmの例えば穴を加工すれば、きれいなまる穴が加工できる。ところが直径100ミクロン(0.1mm)、髪の毛ぐらいの穴になってきますと、誤差が5ミクロンで加工したのでは、こんな形になってしまう。もし直径10ミクロンの穴になったらどうなるかということ、例えばこんなふうになってしまつて、これはまるい穴には見えないということになります。ですから、直径10ミクロンのまるい穴を加工したいとなると、誤差は5ミクロンではだめで、例えば0.05ミクロン、こういったオーダーにもってこななければならないわけです。これはなかなか簡単ではないということですが、そういうことが要求される。

もう一つは、加工単位が小さいということが要求されていまして、これはどういうことかといいますと、少しずつ加工をなささいということです。いっぺんにざくざくっと取っていくようでは微細なものは加工できないというこ

とになります。ですから旋盤で削るのも、5ミクロンぐらいずつ削っていくとすると、丸い棒を作るのに、直径1mmならこんな格好になる、直径100ミクロンになるとなんかギザギザしている。直径10ミクロンを削ると、なんだか棒じゃない、こういうことになってしまう。ですから直径10ミクロンの丸棒が欲しいというときには、5ミクロンずつ削るなんていう荒っぽいことをしてたのではだめだということになります。というわけで、この二つの基本、「加工精度が高い」こと、「加工単位が小さい」こと、この二つを満足することが必要ということになります。

この二つを満足するのは、そんなに簡単ではないけれども、原理的には結構いろんな方法についてできますので、マイクロ加工というのは非常に様々な方法によって実現することができます。

(OHP)

現在、実用的に使われるマイクロ加工の手法を、代表的なものをあげてみると、それらが幾つかのグループに分けられます。一つのグループは、型を使って、その形をそのまま材料に写しこむ、コピーする形で製品をつくるわけです。もう一つは、工具を使って、それを動かして形をつかっていくというタイプ。もう一つは、材料の上にマスクを付けて、そのマスクの上にあるパターンを材料の中にほりこんでいく。深さのほうは処理の時間で決めてやる。こういったタイプのものがあります。それぞれに幾つかの加工方法があるということになります。

この中で、工具を使って、それを動かして加工していくという方法は、型を使う方法に比べますと、加工する形を自由に指定できるという利点があります。型を使う場合も、型の形状で製品の形状が決まってしまうと、ちょっと違う形ということは簡単にはできない。

それから、マスクを使って加工するのに比べますと、工具を三次元的に動かすことができ、三次元形状、形状の縦、横、高さ、全部正確に指定することができます。こちらのほうは、処理時間といったような要素が入りますので、これに比べては不利ということで、この工具を動かして加工するというタイプは、三次元形状のいろいろな形を加工するのに適しております。このグループに属するものはたくさん加工法があります。放電加工、切削、研削、超音波加工、あるいはレーザ加工、イオンビーム加工、電子ビーム加工、こういった昔から使われている加工法や、最近新たに出てきた加工法、いろいろな手法がございます。私の研究室では主に工具を使った加工法の研究をしてきておりますので、このグループのものを中心にご紹介したいと思います。

(OHP)

まず最初にマイクロEDM（放電加工の略）をご紹介します。

(OHP)

放電加工というのは、電気の放電です。例えば、この金属と金属の間に電圧をかけてやりますと、もしここにある絶縁液の絶縁耐力より高い電圧だと、あるいはこの距離が非常に狭いと絶縁が破壊して電流が流れ始めて放電が起きます。放電が起きますと、その熱で材料が溶けまして、この加工液が気化した圧力によって溶けた材料が周りに飛び散る。そしてこういうふうの一つの小さなへこみができます。これのことをクレーターと呼んでいますが、これを何回も何回も繰り返しますと、こちらの面がぐーっと削れることになります。というわけで、この様子を非常に遠くからながめるとこうなりまして、工具の電極、それからこちらが加工しようとしているもの、工作物、近づいたところから徐々にこの工作物が放電によって取られていきます。ですから、この電極をずっと送り込んでいきますと、次々加工されて、結局、電極と同じような形が相手の材料に掘れる、これが放電加工の原理です。

この放電加工というのは、こうやって放電で溶かして取りますので、加工するときあまり力がかからない。そういうわけで非常に細い工具を使って加工するのに適している加工法です。

(OHP)

放電加工を使いますと、いろいろな形の加工ができます。細い電極を使って、それをまっすぐ送り込んでやりますと、細い穴の加工ができる。それから、形を作ったような電極を使ってやりますと、その形がコピーされて、こういう同じようなへこんだ形の格好になる。もしこれをまっすぐ送るだけではなくて、こういうぐあいには動かしてやりますと、それに従ってこのようなへこんだ形が加工できる。今度は逆に、こういうブロック状のものを電極にして、こういう棒を加工するということもできるわけです。またさらに加工するときに、こういうブロックを使わないで、細いワイヤのようなものを使ってやりますと、こういう具合に尖ったピンとか、そういうものをつくることができます。また、材料をぐるぐるまわしてないで止めておいて、次々こうやって削ってやりますと、例えば四角い棒をつくることもできるというわけです。

(OHP)

このなかで一つの重要な技術というのは、最後のほうに示しました細いピンをつくる方法です。こういう方向で、名前がWEDGとなっています。ゴルフをするときのWEDGEとは綴りが違って最後にEがありません。これは「ワイヤ放電研削」という手法で、Wire electro discharge grindingの頭文字をとったものです。このWEDGという手法は細い金属の線を電極として使いまして、これでピンを削る方法です。削る原理は放電によっているという方法です。この方法を使いますと非常に細いピンを削れる。な

ぜかという、加工するときに力がほとんど加わりませんので、この細くなったピンが曲がるという心配がありません。

もう一つの特徴は、このワイヤガイドというワイヤを支えているものですが、これをコントロールしてやりますと、いろいろな形の加工ができます。この方法は、いわゆる砥石を使った研削とよく似ております。もしここの部分が研削の砥石だったら、ぐるぐる回って研削になるわけです。研削と違うのは、加工するときに力がかからないということと、もう一つは、この研削工具は必ず加工しているとだんだん減ってくるものなのですが、このワイヤも放電するとやはり減ります。ところがワイヤを少しずつ動かしておりますので、加工しているところでは常にワイヤの新しい部分がきているということで、研削でいうならば、全く減らない砥石で加工している研削ということになります。ですから、減らないので、予定したとおりの形が加工できる。つまり非常に精度のいい加工が可能だということになります。

(OHP)

例えばこんな細いピン。直径が5ミクロン、こういったものが自動的に生成できるわけです。これはタングステンの細いピンですけれども、皆さんの髪の毛の直径が50～70ミクロンぐらいですから、このぐらいの太さが髪の毛になります。それに比べていかに細いかということがわかりかと思えます。

(OHP)

この方法で加工した世界で一番細いピンはこれです。直径が2.5ミクロン、さっきのやつの上に半分ということになります。

(OHP)

ただ、まるい細いピン以外にも、こういういろいろな形を加工することができます。

(OHP)

少し工夫をいたしますと、このように複雑な形です。こういうものも加工できます。これはWEDGという方法を使いまして細いドリルをつくった例です。ドリルというのは機械的な力で穴を加工する工具です。これをぐるぐるまわして、まわしながら押し込んでいきますと材料に穴が加工できます。非常に細いドリルというのはつくるのが難しいわけです。研削でつくろうとすると、ドリルが細いために加工しているときに曲がってしまうとか。この場合は非常にかたい材料を使っています。かたいほど減らなくていいわけですから、焼結ダイヤモンドを使っています。そういうものはなかなか加工できませんが、ワイヤ放電研削(WEDG)によりまして簡単に加工ができるということで、直径150ミクロンのドリルをつくった例です。

(OHP)

さて、このWEDGという方法を使うと、いろいろな細いピンの類ができますので、それを使って今度は放電加工で細い穴の加工ができるようになります。先ほどの5ミクロンのピンを使いますと、こういう直径5ミクロンの穴が加工できることになる。このくらいの穴になりますと、肉眼では存在が確認できないような穴です。

(OHP)

それから、穴をあけた後、場所をずらして壁を次々取って行ってやりますと、こういう幅10ミクロンぐらいの細いスリット、こういうものを加工することもできます。穴をあけて、それをちょっとずらして、また穴あけ加工をやる。2回目からは穴ではなくて、穴の壁を次々削っていくことになります。そういう方法でこういう細いスリットも加工できます。

(OHP)

さらに最近の技術では、三次元的な形状加工、こういうものができるようになっております。これはモールド用の金型を加工した例です。形は自動車の形をしております。長さが500ミクロン(0.5mm)ということは、皆さんがご持ちの自動車の大体1万分の1のスケールです。全然目では見えません。何かあるなということは見えます。こういう金型を放電加工で加工しています。そのとき使った電極は、こういう3つの種類を使い分けて加工しております。四角い棒、一辺が60ミクロンの棒、これは直径が50ミクロンの丸棒、これは一辺が40ミクロンの四角い棒です。こういうものを順次使いまして、こういう大きなところは太い棒で、カーブのある部分は丸棒で、こういう狭いところは細い四角棒でという具合に次々に加工しまして、このようなものをつくることができるわけです。どういうプロセスかという、詳しいことをお話しする時間はありませんが、およそこんなイメージで、電極を動かしながら少しずつ少しずつ深くしていく、こういう方法です。

(OHP)

こういう方法でやっていると、電極の先端がだんだん減ってくるわけで、その分はどれだけ減るかという予測は正確につけることができまして、この数式を使って、減った分だけよけい加工するということをしてやれば、予定通りの正しい深さに加工することができます。

(OHP)

これは先ほどの金型に樹脂を埋め込んでつくった自動車でございます。長さ500ミクロンですから非常に小さい。もっともこれは、この下にへばりついておりまして、全然走らないのですが、こういうものができるということは、自由ないろいろな設計をしても、その形がちゃんと加工できるのだということを示しているわけです。

(OHP)

それから、先ほどのような電極を使わないで、細いパイ

ブを電極にして同じように加工することもできまして、これも一つの金型ですが、出っ張った部分、引っ込んだ部分があるような金型です。こういったものを加工するような、すでに市販の機械も発売されております。

(OHP)

また、小さい穴などは、非常にたくさん加工しなければならないというケースが多くて、人間のサイズというのはだいたい1m以上ありますので、人間に役に立つものというのは、こういうでっかい物体に何らかの影響を与えなければならないわけで、そのためには、小さいものであればあるほどたくさんいる。先ほどの帽子のクーラーだって、マイクロクーラー1個ではちっとも冷えませんから、例えば100個とか付けなければならない。そういうわけでたくさん加工する必要があります。穴加工をたくさんやる技術というのも研究しておりまして、例えば先ほどの放電加工で穴を開けるという場合に、電極をつくって、それからそれで穴をちょっと加工して、また減ったから、もういっぺん電極つくって型を起こしてというようなことをやっているとな非常に手間がかかってしまう。ここで示したようなシステムは、電極をつくりながら穴も加工するという装置で、ですからどんどん繰り出してくれば、次から次へと何にも手間をかけずにどんどん穴を加工できる、こういうようなシステムでございます。

(OHP)

そういう方法を使いますと、こういうふうにとくさんの穴が連続的にどんどん、ほっといても自動的にできてくる。電極のほうはずっと自動的に供給されていくということになります。

こういうふうにとくさん穴の開いたメッシュみたいなものも用途がございますし、また先ほどちょっと言いましたように、自動車のエンジンの中の燃料噴射ノズルみたいなものも、非常にとくさんの穴を次から次へと加工しなければならないというわけで、そういうものに対してはこういう手法を適用することができるわけです。

(OHP)

さて、次にLBM (レーザー・ビーム・マシニング)、レーザー加工のことです。国際的に加工の分野ではこの言葉も結構知られるようになっていきます。

(OHP)

レーザー加工といってもいろいろなレーザーがありまして、それによって加工の原理も違えば性能も違うというわけですが、最近マイクロ加工で特に注目されているレーザーにexcimer laserというのがあります。このレーザーは、光の波長が非常に短い。紫よりさらにずっと光の波長が短くて、現在のエキシマレーザーは紫外線領域です。短いもので190ナノメートル前後の波長を持っています。こういう非常に短い波長の光になりますと、光というのは電磁波なので波

動なんです、波長の性質と同時に粒子の性質があります。この光を粒子と考えたときには、それを光子といいます、光子という粒がぶつかることになるわけですが、このエネルギーは波長に反比例する。ですから、波長が短くなればなるほど光子のエネルギーが大きくなる。そしてちょうどこのエキシマレーザーのような波長になりますと、光子がぶつかるというんな物質の原子が結合しているエネルギーより強いものですから、それを離すこともできます。つまり光の当たったところは突然ばらばらになってしまう。個体だったものが気体になってしまう、このようなことが起きるわけです。そういうことで、このレーザーは、ほかの炭酸ガスレーザーのように加熱して溶かして取るとか、そういうのと違って、当たったところが消えてなくなるというレーザーでございます。というわけで、細くしほってあててやると、そこだけがなくなりまして、周りに全然影響を与えないということで、非常に寸法の小さいものの加工をしやすいレーザーです。

(OHP)

このようなレーザーを使って途中に入れたマスクの像(イメージ)を投射してやりますと、スリットを通ってきたレーザー像のとおり材料が加工される。

それから、こちらは穴をいくつもあけた例です。これは1個ずつあけたのではなくて、こういうぐあいに穴が並んでいるマスクを使って、その像を材料の上に結ばせる。そうすると、そのとおりにこういう穴があくわけです。ですからマスクのほうできちんと寸法と間隔を決めといてやりますとそのとおりに一遍にできる、こういう加工法です。

(OHP)

こういうパターンを加工するのはこういうぐあいで簡単ですが、さらにこれを三次元的な形状にまで応用していくという研究も行っております。

それがこの手法でございます、我々はこれをHOLE AREA MODULATIONという名前を付けまして、頭文字がHAMでハムという、おいしそうな名前の方でございます。

これは何かというと、もしこういうマスクを使って加工すると、先ほどのように穴がぼこぼこあいた加工ができるはずで、ところが加工しているときに、このマスクを前後左右に動かしてやると、穴と穴が全部まざってしまっていて、こういうへこみが加工できるということです。もし大きな穴と小さな穴があいてますと、大きな穴に相当する部分は深い窪みができて、小さな穴に相当するのは浅い窪みができる。つまり当たる光の量が違うからです。これをさらに拡張いたしますと、いろんな大きさの穴をつくってやりますと、それに応じて深さが違う形状が加工できることになる。つまり自由な三次元形状のへこみが、穴の大きさだけを変えたマスクをつくってやることによって組成でき

るという方法です。

(OHP)

まだこの方法は去年の暮れに開発された方法で、あまり変わった形はできていませんが、こういうマスクを使って加工して、段つきのへこみを加工するのに成功していました。先ほどのように、大きな穴があいていたところは深く加工されて、小さな穴のところは浅く加工する、こういうのが現実に確認されております。

(OHP)

もう一つ、最近開発された別のタイプのレーザがあります。それは、FS レーザと書いてますが、何となく見たことがないと思われる方が多くいらっしゃるのではないかと思います。これはフェムト秒の略です。フェムトというのは10のマイナス15乗のことです。つまり1秒の1000分の1がミリ秒、その1000分の1がマイクロ秒、その1000分の1がナノ秒、その1000分の1がピコ秒で、その1000分の1がフェムト秒なんです。つまりそのぐらい短い時間のパルス、そういうレーザです。非常に短い時間にたくさんのエネルギーをばんと当てることによって、今度は光子エネルギーではなくて、その中間的なエネルギーの大きさによって材料を全部蒸発させてしまう、気化させてしまう、こういう方法です。こっちのほうがちっと荒っぽい感じがしますが、それでも効果はエキシマレーザと同じでして、光の当たったところだけが消えてなくなる、ほかのところは残る、こういう加工法なので、やはりマイクロ加工に非常に向いているわけで、これは一つのサンプルです。これは医療用の部品ですが、プラスチックを加工した例ですが、こういう複雑な形、これをレーザビームを照射することによって切り取っていった、そういう加工例です。このレーザも、まだエキシマレーザと違って市販の装置は普及していませんけれども、そろそろプロトタイプが市販されるようになります。将来的にはいくつかの応用分野で使われるのではないかと思います。

(OHP)

さて、いくつかの電氣的な加工法、放電加工とかレーザ加工のいくつかをご紹介しましたが、一つの加工手法だけではなくていくつかの手法を組み合わせるとまた違ったことができるということがあります。「Combined Process」と書きましたが、複合的な手法というのがあります。

(OHP)

これは一つの例ですけれども、いくつかの電氣的な手法を組み合わせると非常に細いノズルをつくるという例です。

初めに、このような細いピンをつくります。これはご紹介した WEDG という方法でつくることができます。WEDG の場合は放電加工なので、表面がざらざらした面になっています。それをつるつるにするために、WECG

——ワイヤ電解研削というもので、電気分解によって金属の表面層を溶かし出すという方法ですが、WEDG と似たようなスタイルでワイヤ電極を使ってこの表面をすーっとなぞってやりますと、表面のでこぼこが消えてつるつるになるという方法です。そうしたあとで、この表面にメッキをします。厚くメッキをしてやるわけです。そして今度は外側、メッキの外側というのはなかなか形のコントロールが難しいんです。でたまたま形になってしまうわけですが、外側をまた WEDG によってきちっと加工します。こんなふうになりまして、最後にこの中のコアというのをぴっと抜いてやりますと、こういうものができる。この内側の形というのは、最初につくったピン（コア）と同じ形をしているわけですから、こちらが正確にできていれば、こちらでも正確にできているということで、ノズルの内側が非常に正確につくれるという特徴がございます。

それから、こういう細くて長い穴が簡単につくれる。これをもし掘ってつくろうとすると非常に難しいわけです。浅い穴はいいが、深い穴は極めて難しいのですが、先に中をつくっておいてから外側をつくるという方法でやると簡単にできます。

(OHP)

順番にずらずらと工程が書かれていたので一見複雑そうなんですけれども、装置としては簡単で、最初にここに棒を取りつけて、これをワイヤが下りてきてコアに加工する。加工が済んだら、今度はこっちのほうから、直径数ミリメートルの細いタンク——タンクといっても、直径が数ミリしかないのですが——が出てきまして、中をメッキ液が流れる。そして通電してやると周りにメッキができて、済んだらこれが引っ込んで、こっちからまたワイヤが下りてきて外側を加工する。こういうことでやりますので、わりと簡単な装置でこのような加工をすることができます。

(OHP)

例えばこのような非常に細い、直径6ミクロンというようなオープニングをもったノズル、こういうものをつくることができました。

(OHP)

それから、真っ直ぐな形ではなくてもつくれるわけで、テーパ状のラップミみたいな形したもの。これがコアで、内側の形がこういう形、これは外側です。こういうものをつくることもできます。内面は非常に、このコアの表面がコピーされてなめらかですから、例えば光なんかを反射させながら集束していく。こういうようなプローブに使えるような方法です。

(OHP)

もうちょっとなじみのあるものとすれば、注射針みたいなものもつくることができます。これは注射針型につくったものですけれども、直径が100ミクロンぐらいしかあり

ませんから、髪の毛みたいな細い注射針ということになります。ここでおわかりのように、内側は、例えば直径 70 ミクロンしかないわけです。長さが 2.5 mm ほどあります。非常に細長い穴ができています。こういうものも穴を掘って加工するのは難しいけれども、穴の外側をつくるということならばわりと簡単にできるというわけです。

(OHP)

さて、電氣的な加工法のところでだいたい時間をとりましたが、これはマイクロ加工では電氣的な手法というのはなかなか有用性が高いということでした、もちろん機械的な加工法も非常に役に立つものがたくさんございます。

(OHP)

特にマイクロ化で非常に有望な方法としてあげられる一つは、超音波加工というものです。超音波加工というのは、実は砥粒を使って、つまり砂のようなつぶつぶのものをを使って材料を削って加工する、磨くような加工法です。

この加工法の特徴は、このような加工原理で、工具が超音波周波数で振動している。その振動している工具で、かたいつぶつぶを水に混ぜたようなものを叩くわけです。そうすると、この中の砥粒、かたい部分、これが相手の材料を叩いて壊していく、少しずつ叩いて壊していく。こういうタイプの加工法なので、相手の材料が脆い材料ならば非常にかたくとも簡単に加工できる加工なんです。脆い材料というのはなかなか加工が難しいんです。例えばガラスなんかそうです。ガラスに穴をあけると思うとなかなか、ドリルでガリガリやるわけにいかないですから、ところが超音波加工でやるとガラスなんか簡単に加工できるということで非常に有用な加工法です。ただ従来マイクロ加工にはあまり使われていない。それはなぜかという、こういう問題なんです。

(OHP)

超音波振動、超音波周波数というのは耳に聞こえないような速い振動で振動する。そうすると大抵何でもつかんでいるものはゆるんでしまう。ですから、加工するための工具をホルダーに取りつけるわけですが、普通に取付けると加工している間にここが緩んでおこっちゃうということになります。というわけで、これはハンダなどによって完全にくっつけてしまう必要がある。

ところがハンダづけとか、溶かした金属でつけるような作業というのはなかなか精度よくできない。例えばこの例のように少し曲がってしまうとか、中心から外れてしまうとか、こういうことがおきまして、加工する寸法が数十ミクロンとかの小さなオーダーになると、この方法はちょっと無理だというふうに言われていたわけです。

(OHP)

そこでいくつかの方法がありうるわけですが、一つの画期的な方法は、予めつくった工具をハンダでつけるのでは

なくて、工具の素材をハンダでつけておいて、後で、つけた状態で削って細い工具にする、こういうふうにしてやる。そうしますと、超音波加工機の装置の上でこれをつくっているわけですから、できあがったときに、例えばこれを回転させながらつくれば、回転の中心と、できあがった工具の中心は完全に一致してますから、ずれちゃうということがないわけです。この機械の上で削ってつくっているわけですから、当然この機械に対してまっすぐにつくれている。こういうことになりまして、非常に細い工具でもきちんと取り付けられた状態で加工ができるようになります。これによって、従来 100 ミクロン以下は無理と言われていましたが、20 ミクロンぐらいでも加工できるようになっています。

(OHP)

例えば、これは直径 37 ミクロンとなっていますが、これはシリコンに超音波加工で加工したもので、きれいに加工できております。シリコンもなかなかかたい材料で、ドリルで削るというわけにもいかない材料ですが、超音波加工ですと、このように加工できる。

(OHP)

超音波加工の場合は、ドリルでの穴あけなどと違いますが、工具が必ずしもまわっている必要はないわけです。そうしますと、例えば四角い工具を使って加工すれば四角い穴、三角断面の工具なら三角の穴がそのまま加工できるということになります。

(OHP)

もちろん横にも動かしてやる。こういうことやりますと、丸棒の工具を使ってもこういう細長い溝のようなものも加工できる。

(OHP)

さらに、いろいろな動かし方をしてやるとこんな複雑な形でも加工できる。これは 300 ミクロンスケールですが、こういうところに穴があいていたり、こういうふうになっている。そういうようなものが自動制御によって作成することが出来ます。

ただ、今ご紹介しただけの工法のレベルでは、20 ミクロンとか、そのぐらいのオーダーまではいいですが、それ以下が難しい。放電加工ではすでに 5 ミクロンぐらいの穴加工ができるようになっているわけで、そこのレベルまでもっていくにはどうするかという話になります。それが実現できたのは、このような形で加工した場合です。

(OHP)

これは何かというと、超音波加工といえば工具を振動させるというふうに決まっていたのですが、その考えをやめまして、工作物、加工されるもののほうを振動させるというふうにするわけです。そうすると、どういういいことがあるかといいますと、この工具を保持する側は非常に簡単

にできるんです。工具は振動する必要はありませんから。例えば回転はいるとしても、軸受けがあつて、こういう非常にシンプルな形。これは非常に精密な工作機械の工具の機構と同じなんです。ですから、例えば放電加工機とか、あるいは精密な治具ボーラーだとか、そういう加工装置の主軸の機構がそのまま使えるということになりますので、この工具側の精度というのは飛躍的に向上いたします。それに対して工作物のほうは振動しなければなりません、工作物はただ振動しているだけでいいわけです。動かす必要はありません。ですからこちらでもシンプルでいいわけです。ということで、このようなセットアップにしますと、機械的な意味での精度というのは最高のレベルまでもっていくことができる。

(OHP)

実際にこのようなセットアップにしますと、ご覧のような直径5ミクロンという穴も加工に成功しております。これは石英ガラスの穴を加工したわけです。もちろん先ほどお見せしたようなメカニズムによるだけではだめで、こういう小さなものを加工するには、加工するときの砥粒、この直径はうんと小さくしなければだめで、普通の超音波加工だと、何十ミクロンという大きさの粒を使っていますけれども、それではこの穴より大きいですから、全然こんな加工はできないので、こういう小さな穴を加工するには、サブミクロン、例えば0.1ミクロン、0.2ミクロン、こういった大きさの粒を使わないといけない。

それから、工具が非常に細いわけです。5ミクロンの穴を加工するのだと、もっと細い工具じゃなきゃだめで、4.5ミクロンとか、こういった工具を使うわけですから、うっかりぶついたらもうおしまい、すぐこわれる。ですから、その加工の荷重を検出して、送り過ぎないようにコントロールするというほうの感度を非常に高くする必要があります。しかし、そういうことをしてやれば、こういうものも加工できるということになります。

ただ、ここで一つ問題なのは、超音波加工というのは、例えばダイヤモンドの粒とか、アルミナの粒とか、そういうものを使って叩いて加工していますから、相手に穴を加工するのはいいですけども、工具のほうもどんどん加工されて減ってくるわけです。ですから、工具が減るために、あまり深い穴があけられない。加工していくとどんどん工具が短くなってきますから、そういう問題があるわけです。じゃどうしたらいいか。それは工具を強くするしかないんです。どうすれば強くなるか。これしかないというのは、ダイヤモンドの工具を使うということです。

(OHP)

幸いなことに、焼結ダイヤモンドという、先ほどもドリルの例をお見せしましたが、ダイヤモンドの粉を焼結してつくったものがあります。これを工具にして使うと非常に

効果があります。これはタングステンカーバイドといって超硬合金なんですけれども、これも非常にかたいのですが、ダイヤモンドよりはやわらかい。

これを使って加工した場合は、例えば0.74と書いてありますが、これは工具の消耗する割合なんです。掘った穴が1なら工具は0.74減っている。掘った穴と同じぐらい減っているわけです。それに対して焼結ダイヤモンドの工具を使うと0.01になります。つまり加工した深さに対して100分の1しか減っていないということになります。このレベルになってきますと、通常の工具と同じような感覚で加工に使うことができますので、深い穴を加工するか、いくつも穴を加工するか、そういうことが簡単にできるようになります。

(OHP)

これは一つの例ですけども、厚さ150ミクロンのガラス、それに直径20ミクロンぐらいの穴を掘ったという例で、これだと深さが直径の7.5倍、非常に深い穴です。こういうものを加工できて、しかも次々と工具を換えることなく加工しております。

(OHP)

工具の減りが少なくなれば、こういった溝を掘りこむのもできるようになります。深い溝です。例えばこれなんかは幅が7.7ミクロンですが、深さが18ミクロンまで、深い穴を掘る。こういうことも工具が減らないためにできるようになります。

(OHP)

というわけで、比較的最近出てきたような新しい加工法を中心にご紹介しました。もちろん非常に古くからの加工法、切削という加工もマイクロ加工に適用することはできます。

時間がなくなりましたので、簡単な例だけ見てみます。

(OHP)

これは切削で溝を加工した例です。こちらに溝が加工されています。これは幅が50ミクロンの溝です。これをこちらに拡大してありますが、こういう工具をつくりまして、これでジージージーツと削って加工する。髪の毛より細い溝でも削れるというわけです。

(OHP)

それから、穴などを量産するのにいい方法としては、打ち抜きというのがあります。皆さん紙をファイルするとき穴をあけますが、あれの延長。ただ非常に寸法が小さくなってきますと何が難しいかというと、上から下りてくるのはパンチといいます、下にあいてる穴をダイといいます。パンチとダイの位置を合わせるのは非常に困難です。パンチも見えない、ダイも見えない。それをどうやって合わせるか。ちょっとでもずれているとぶつかって、パンチが壊れてしまいます。そういうときに一つの方法は、先ほども

言いましたけれども、その装置の上で工具をつくるというのは非常に有効で、打ち抜きのパンチの装置の上でピンをまずつくって、これを使ってその真下に穴をあける。もういっぺんこれを引き上げて先をちょっと成型しますと、パンチができて、こちらにダイ・穴ができます。これは上下にしか動いてないわけですから、パンチの位置とダイの位置は初めから同じになっている。このような方法を使うと非常に細いパンチ、非常に細いダイ、これが位置がぴたっと合った状態で用意できます。ですからあとはこここのところを押してやればよいということになります。このような方法を使いますと、数十ミクロンといった微細な穴の打ち

抜きが可能になります。

(OHP)

これはずいぶん前になりますが、うちの研究室でつくった装置で、打ち抜きの装置という、何トンプレスとか工場にすごい大きな装置がよくありますが、これは何トンではなくて何百グラムという力で、それぐらい小さな力でも小さい穴は大丈夫なんです。これはすごい装置みたいですけど、実はテーブルの上に乗っかっているんです。直径が

20 cm ぐらいしかありません。こういった装置で微細な穴も打ち抜きができます。

(OHP)

これはサンプルですが、50 ミクロンの穴、これは拡大した絵で、こちらは遠くから見たわけですが、ずらっと打ち抜いたもの。それから、丸くない穴でもこうやって打ち抜ける。とにかくパンチとダイは同じ場所に必ずできている。ですから丸じゃない形でも、とにかく合っているわけですから、そういうふうには打ち抜けば打ち抜けるというわけで、小さな寸法のいろいろな形の打ち抜きが可能な方法でございます。

5 分前になってしまっていて測定の話に入れないので、ここで打ちきりいたします。

測定の話は、もし興味のおありの方は私の研究室、オープンになっておりますので、そちらのほうにお出でいただければ、またご説明いたします。どうもご清聴ありがとうございます。

——了——