

## バイブロスキャニング法による細穴内部形状測定

Dimensional measurement of small holes by Vibroscanning Method

増 沢 隆 久\*・濱 崎 幸 夫\*\*・藤 野 正 俊\*

Takahisa MASUZAWA, Yukio HAMASAKI and Masatoshi FUJINO

マイクロマシニングにより加工された細穴の形状測定は、従来の形状測定手法の適用が困難である。この問題を解決するために振動触針を用いて電気的接触のデューティサイクルを検出し、これを指標として表面の凹凸を測定する新しい手法、バイブロスキャニング法を開発した。試作装置を用いた検証実験により、微小な測定圧で、高感度な測定が可能であることが確認され、 $\phi 200\mu\text{m}$  の穴の実測にも成功した。

## 1. はじめに

微細な工具や部品を加工する技術、マイクロマシニングが脚光を浴びるようになった。最近の10年間ほどでこの技術は大きく進歩し、外形寸法が数十 $\mu\text{m}$ の加工も生産の場において対象外ではないと考えられるようになった。ICのパターン加工のような二次元的形状ではすでにサブミクロンの領域に入ってきている。こうした状況に応じて、寸法測定技術も進歩し、サブミクロンパターンの自動測定も行われるようになってきている。しかし、工具や部品の加工において最も基本的な形状である穴や軸の測定については、サブミリメートルのオーダーですでに困難といわれ、 $200\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ といった直径の穴や軸は、その全体の形状を表現できる測定が非常に難しく、特に穴の場合は事実上不可能というのが実態である。そこで、この測定技術の盲点とでもいふべき、細穴の測定に対して、実用的な手法を模索した結果、電気的接触検知を発展させたものとしてバイブロスキャニング法という新しい測定法を導くことに成功した。以下に、この手法の概要と、実験による有効性の確認結果について解説する。

## 2. 微小穴測定の現状と問題点

穴の内部形状の測定は、基本的には面の凹凸形状の測定である。したがって、表面あらさや表面形状測定の各手法は、本来穴の測定にも適用の可能性を持っている。表面あらさ、形状の測定手法の主なものを大別すると、接触式と非接触式の二つの系統に分かれる。接触式は先端のものが触針により表面をなぞり、その際の触針の

変位をいろいろな方法で検出、測定するものである。一方、非接触式には、上述の触針に対応する探針を、表面に接触させずに、その先端と表面との距離を検出しながら、面の凹凸に追従させて形状測定を行うものと、探針を用いる代わりに細く絞った光や電子やイオンのビームによって表面を走査して凹凸を測定するものなどがある。

現状での細穴測定について上記各グループの問題点は次のようにまとめることができる。

まず、接触式の各手法であるが、いずれも触針の変位は、カンチレバー（とがった触針を保持している棒状の部分）の変形または変位として検出している。細穴の場合はこのカンチレバーは穴内部に挿入されることになるため、非常に細い（穴の直径より細い）ことが必要である。したがって変形または変位を検出する機構をカンチレバー部に設けることができなくなり、カンチレバーを保持する、さらに大形のアーム等において、力検出の形で測定しなければならない。カンチレバーの変形が充分小さくなるようにしてこのような測定を行うには、非常に高感度の力測定が必要で、S/N比やドリフトの難しい問題に直面することとなる。

非接触式の各手法のうち、ビームを用いるものは次のような理由で細穴測定には向いていない。すなわち、穴の形状測定の場合は、穴の内壁、すなわち穴の開口面に垂直な面の測定を行うことになる。したがって、穴の内部でビームの方向を $90^\circ$ 変更することが必要である。直径の小さい穴ではこのような機構を穴内部に挿入することが困難である。

非接触式のうちでも、探針を用いる手法の場合は細穴測定の実現の可能性がある。代表的な手法として、STM (scanning tunneling microscope) や AFM (atomic force microscope) で採用されている測定法が

\*東京大学生産技術研究所 第2部

\*\*東京ガス(株)

挙げられる。これらはいずれも測定力がきわめて小さくてよいことから非常に細いカンチレバーを用いることが可能で、それを微小穴に挿入することができる。しかし、両者に共通の問題点は、本質的に超高感度の測定法であるために、大きな凹凸、大きな測定寸法には適用しにくいこと、また、実用面でいえば、管理された測定環境が必要であり、測定に長い時間を要することである。本稿で提案するバイプロスキャンニング法との比較は後述する。

これまでに述べたように、現状では表面あらさ、形状測定装置で、 $\phi 500\mu\text{m}$  以下の穴の内部形状測定に適用できるものはほとんどないといってよい。それでは、現場において、加工された穴の評価がどのようにして行われているのであろうか。入口形状、出口形状の測定が工具顕微鏡等の画像により行われるほかは、ピンゲージの挿入による最小内径のチェックが行われている程度であり、内部形状測定は諦めている、というのが現状である。

一方、微小穴の加工技術は年々向上しており、直径数百  $\mu\text{m}$  はおろか、数十  $\mu\text{m}$  の加工も実用レベルで充分行えるようになってきている。このような背景から、加工した穴の評価の必要性はかつてなく高まっており、これなくしては現場での品質管理に支障を来すばかりでなく、加工技術そのものの評価も難しくなっている。そこで、これらの要求に応えるために、従来の表面あらさ、形状測定とは少し異なった原理に基づく、新しい形状測定法、バイプロスキャンニング法（以下 VS 法とする）を開発した。

### 3. VS 法の概要

本手法は前述のグループ分けに従えば、接触式の表面あらさ、形状測定法に属する。ただし、現段階では主として表面形状測定が対象である。従来の接触式手法との

大きな違いは、表面の凹凸をカンチレバーの変形、変位によって検出するのではなく、直接電氣的に検出する点である。表面の凹凸検出ということは、結局、表面上のある点の表面に垂直な軸（これを  $x$  軸とする）上での位置（座標）を測定することである。この座標を以下、面の位置、ということにする。

VS 法では、つぎのようにして面の位置を測定する。図 1 のように、カンチレバーと被測定物との間に電圧  $E$  を印加する。カンチレバーには加振器により  $x$  軸方向に微小振幅  $2a$ （両振幅）の振動を与える。振動周波数がカンチレバーの共振周波数より充分小さければ、触針先端も振幅  $2a$  で振動することになる。触針先端と被測定面の間の距離を  $h$  とし、振動を与えない時  $h = h_0$  であるとするとき、電圧印加回路に挿入した抵抗器  $R$  の端子電圧  $e$  は、 $h_0$  によって次のように変化する。

- 1)  $h_0 > a$  の時（触針が被測定面から充分離れている時）  
 $e = 0$
- 2)  $h_0 \leq -a$  の時（触針が被測定面に完全に押し付けられている時）  
 $e = E$
- 3)  $-a < h_0 \leq a$  の時（触針が被測定面に近付き、時々接触する状態の時）
  - i)  $e = 0$  ( $h_0 + a \sin\omega t > 0$  の時)
  - ii)  $e = E$  ( $h_0 + a \sin\omega t \leq 0$  の時)

ただし、ii) の状態では前記 2) と同様、触針の運動は被測定面によって防げられ、その分だけカンチレバーがたわむことになる。また、カッコ内の条件は、加振器に

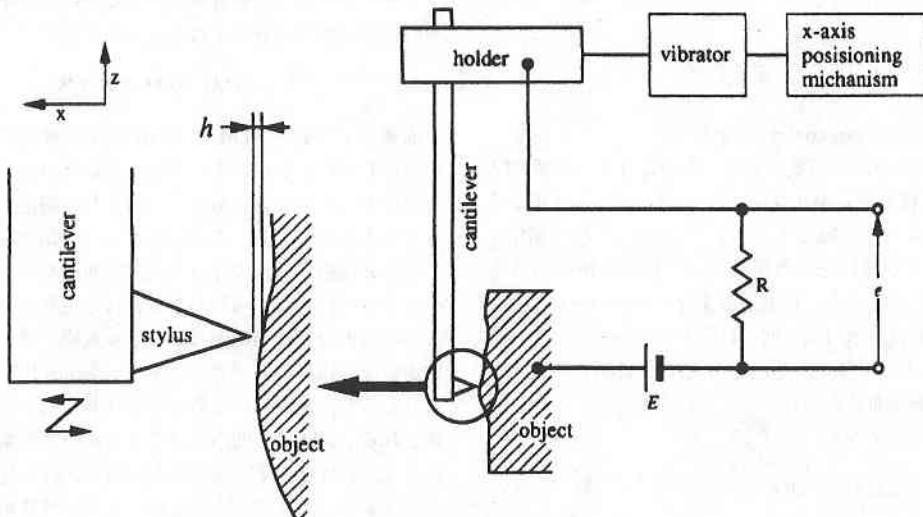


図1 VS法の表面位置検出原理

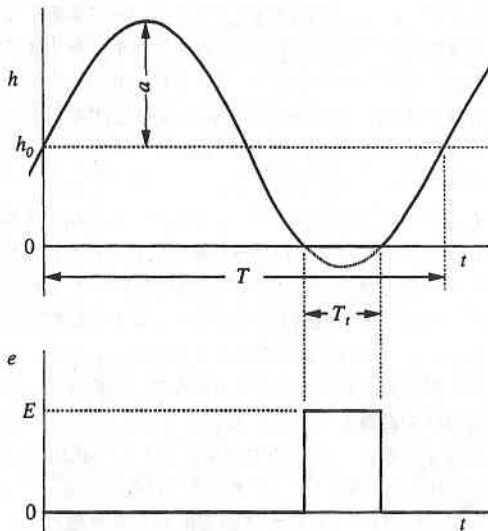


図2 触針の位置と出力信号の関係

より与えられる振動が周期  $2\pi/\omega$  の正弦波である場合の例である。

$-a < h_0 \leq a$  の場合の触針の動きと出力電圧の関係を図2に示す。ただし、 $h$  は触針先端と被測定面の距離を示しているが、仮に被測定面によって防げられないとした場合の曲線部分を破線で示す。 $h_0$  も、前述のように、 $h_0 > 0$  では実の値であるが  $h_0 < 0$  では仮想の値となる。図は  $h_0 > 0$  の例を示している。

図からわかるように、出力電圧  $e$  が  $E$  となる時間（つまり触針が被測定面に接触している時間） $T_t$  は、 $h_0$  によって変化し、 $h_0$  が小さくなるほど長くなることがわかる。

$T_t$  の振動の周期  $T$  に対する比率をデューティサイクル  $D$  とすると、次式が成り立つ。

$$D = \frac{T_t}{T} = 1 - \frac{\arccos(-h_0/a)}{\pi} \quad (1)$$

ただし、 $(0 < \arccos(-h_0/a) \leq \pi)$

$D$  と  $h_0$  の関係を図3に示す。このように、 $h_0$  が増大すると  $D$  は単調に減少する。したがって、図1のような構成で電気的接触のデューティサイクル  $D$  を測定することにより触針先端の振動中心と被測定面の距離  $h_0$  を知る事ができる。被測定面をカンチレバーに平行に移動させれば、その面の凹凸に応じてデューティサイクル  $D$  が変化するので、それを(1)式により  $h_0$  に変換すれば、面の形状曲線が得られることになる。

(1)式を変形すると、

$$h_0 = -a \cos\{\pi(1-D)\} \quad (2)$$

と簡単な変換式が得られる。

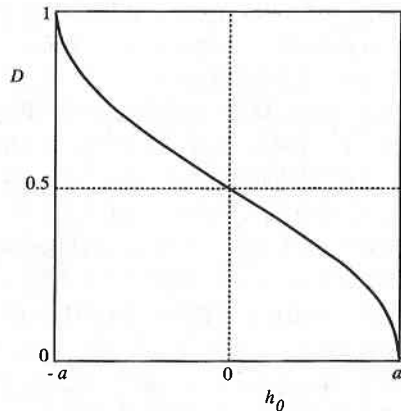


図3  $D$  と  $h_0$  の関係 (計算値)

#### 4. 加振の必要性

図3からわかるように、この測定法において、振幅  $2a$  が小さいほど検出感度が高くなる。もし加振せずに触針を被測定面に近付ければ、 $h_0 = 0$  となった瞬間に  $e$  は0から  $E$  になるので、それにより面の位置を知ることができるはずである。実際このような方法は、接触検知と称して、工作機械において工作物の位置検出などに広く用いられている。しかし、固体同志が接触したときの電気的導通現象はバラツキが大きく、接触検知法によりサブミクロンの検出精度を得ることは難しい。VS法における触針の加振は、接触検知を繰返し行い、データの平均化をはかることに相当し、これにより実用的な精度の確保が期待できる。接触検知法によりデータの平均化をはかろうとすると、接触位置測定を何回も行うために長時間を要するが、VS法では振動的接触のデューティサイクル測定に置き換えているため、簡単に、かつ短時間で必要なデータを得ることができる。

#### 5. STM, AFM との比較

前述のように、STM や AFM は非接触式であり、測定力は非常に小さい。そのため、充分細かいカンチレバーを用いることができ、微小穴に挿入して測定することが可能である。しかし、これらにおいて問題となるのは、測定を非接触で、かつ探針と被測定面の間の距離をきわめて小さく保ちながら行わなければならない点である。この距離の変動許容範囲はトンネル電流や原子間力の測定が可能な距離のオーダーであり、数 nm 以下である。したがって、追従制御系の分解能は非常に高いものが要求される。同時に、凹凸に対しても高い空間周波数に回答しなければならず、限られた周波数応答の範囲では測定速度を小さくせざるを得ない。また、ドリルや放電加工のような一般的な加工法により加工された穴の内面は

マイクロオーダーのあらさになっており、応答すべき振幅も大きなものが必要となるので、条件はさらに厳しい。

一方で、VS法ではもともと接触を許している(というより、接触するのが条件)ので変動範囲は触針の振動振幅程度まで許容される。振幅としては触針の弾性限度内で穴径に対し充分小さいことが条件であり、たとえば、数 $\mu\text{m}$ 程度とすることができる。結果として、追従制御系の感度、周波数応答とも、格段に条件がゆるくなり、高速で安定な測定をすることが可能となる。もっとも、追従制御系の応答については必要条件がゆるい反面、探針の振動周波数によって、測定可能な被測定面の空間周波数が制限され、細かいピッチの凹凸は測定できなくなる。以上をまとめると、STMやAFMは平坦な面のきわめて微小な凹凸の測定に向いているが、マイクロオーダーのあらさを持つ面の全体的な形状を測定するにはVS法の方が装置の構成上、また測定時間において有利であり、実用性が高いと考えられる。

## 6. 測定実験

### 6.1 予備実験

VS法が実際に微小穴測定に適用できることを確かめるために、簡単な装置により基礎的特性を調べた。

piezoアクチュエータにより、一定振幅で加振されている触針を、ステッピングモータ駆動により平面に徐々に近付け、触針の位置と、検出回路の抵抗器両端の電圧から得られたデューティサイクルの関係求めた。この場合、移動距離は図3の横軸に対応するが、 $h_0$ の真の値はわからないので、正確な $h_0-D$ 曲線を描くことはできない。そこで、図3の理想曲線と、測定データとの間で差の自乗和が最小となるように座標を定めたところ、図4のような結果が得られた。この結果によれば、 $D$ が0または1に近いところを除けば理想曲線からのずれはおよそ $0.1\mu\text{m}$ 以内である。この実験で用いたステッピングモータによる送り系の精度も $0.1\mu\text{m}$ 程度なので、適当な座標校正を行えば、VS法によって少なくとも $0.1\mu\text{m}$ 程度の精度で測定が可能であることが確認できた。

### 6.2 装置の試作

VS法が、実用上十分な精度を実現できることがわかったので、実際に穴内部の測定ができる装置を試作した。

VS法により面の凹凸を測定する最も単純な方法としては、図1において被測定物をカンチレバーに平行に移動させて、 $D$ の変化を記録し、式(2)により $h_0$ の変化に換算する方法がある。しかし、その場合は測定できる凹凸の大きさは振動振幅 $2a$ の範囲内であり、図4からわかるように精度を考慮するとさらに狭い範囲に限定される。範囲を広げるために振幅を大きくすると、感度が下

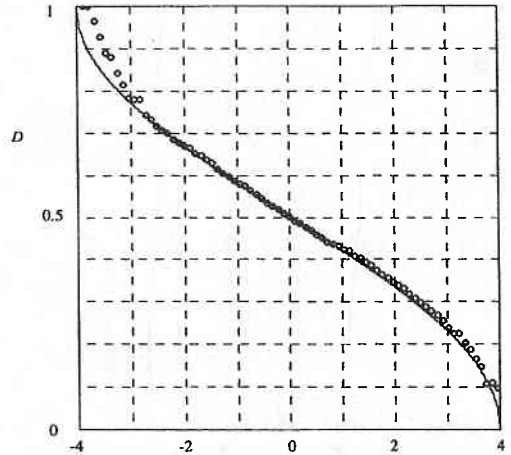


図4  $D$ と $h_0$ の関係(実測値)

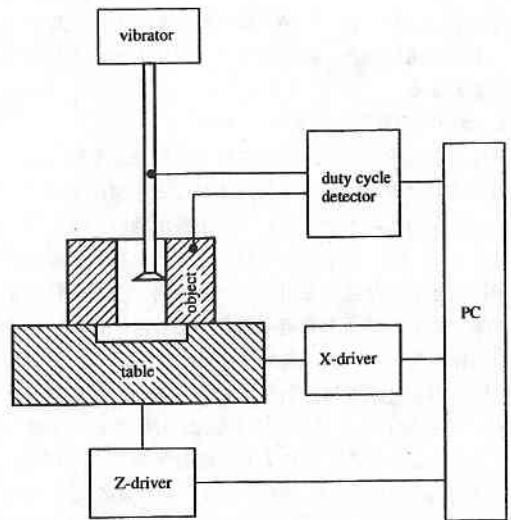


図5 試作装置の構成

がるうえ、接触時のカンチレバーのたわみも大きくなって測定圧が大きくなる。

上のような問題点を避けるため、試作装置は図5のような構成とし、次のような方法で測定を行った。

- 1) デューティサイクルの基準値 $D_0$ を定める。
- 2) デューティサイクル $D$ を測りながら被測定物を $x$ 軸上で移動させ、 $D=D_0$ となるようにする。
- 3) 被測定物の位置 $(x, z)$ を記録する。
- 4) 被測定物を $Z$ 方向に単位量だけ送る。

以下、2)~4)を繰り返すことにより、一断面における穴側壁の凹凸曲線を座標 $(x, z)$ のセットとして得ることができる。つまり、この方法では、STMにおいてトンネル電流が一定となるように探針を面の凹凸に追従させたように、電気的接触のデューティサイクル $D$ が一定となるように触針の振動中心を面の凹凸に追従さ

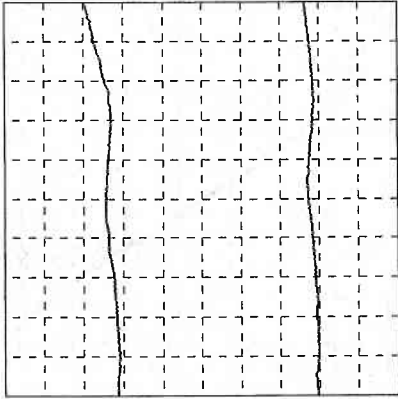


図6 VS法により測定した微小穴の縦断面  
(加工法:マイクロドリル, 材質:SUS304, スケール:  
50 $\mu\text{m}/\text{div}$ )

せている。これにより、小さな振動振幅でも凹凸の大きさによらず追従でき、高感度でかつ測定力の小さい測定が可能となる。

### 6.3 微小穴の測定

試作した装置により、実際に微小穴の測定を行った。穴の測定では少なくとも1断面における両側壁を測定しないと、穴形状のデータとして有用性が低い。そこで、触針として、図5に示すような、カンチレバー先端をつば状に大きくした部分を用い、その片側で一方の壁面を、反対側で他方の壁面を測定することにした。これにより、穴を回転することなしに両側壁の測定ができる。ただし、両側壁間の相対距離は、あらかじめ寸法のわかった基準ギャップを測定しておき、これにより実測のx座標を補正した。こうすることにより、触針(カンチレバーのつば状部分)の直径や、測定方向が反対になるための $D_0$ に対応したオフセットなど、個別の補正がすべて省

略できる。

触針部 $\phi 100\mu\text{m}$ 、本体部 $\phi 50\mu\text{m}$ のカンチレバーを用いて、 $\phi 200\mu\text{m} \sim \phi 500\mu\text{m}$ の穴の測定を試みたところ、従来得られたことのない実測断面形状を得ることができた。図6に実測データから再現した穴の断面形状の例を示す。

この測定例では $a=1.3\mu\text{m}$ としたので、図4の例より高感度となっている。また、 $D_0=0.2$ としたので、接触時のカンチレバーの最大たわみは約 $0.25\mu\text{m}$ である。これから荷重を概算すると約 $100\mu\text{N}$ となり、きわめて小さな測定力となっていることがわかる。

## 7. 結びと展望

電氣的接触検知という、従来精密測定には用いられなかった面検出法に対し、振動触針によるデューティサイクル測定という新しい方式を適用して、実用的な微小穴断面形状測定法を導いた。試作装置により、実際に $\phi 200\mu\text{m}$ の穴の内部形状の測定に成功し、接触式でありながら微小な測定力で、かつ十分な感度の測定が行えることを確認した。また、本手法は検出信号が数Vの矩形波であり、外來ノイズに強いいため、生産現場のように厳しい環境下での適用も容易と考えられる。今回は細穴の形状測定を目標としたが、面の位置を測定する一般的な手法とみなせるので、今後さらにいろいろな分野での応用が期待できる。

(1993年3月19日受理)

### 参考文献

- 1) 増沢隆久, 濱崎幸夫: バイプロスキヤニング法による細穴の内部形状測定, 電気加工技術, 16, 52 (1992) 15-19
- 2) 増沢隆久, 濱崎幸夫, 藤野正俊: バイプロスキヤニング法による細穴の内部形状測定, 型技術者会議'92講演論文集 (1992) 134-135