

論文の内容の要旨

論文題名 ハイアスペクト比マイクロ部品用形状測定技術の開発

氏 名 山 本 正 樹

最小寸法が数十 μm ~数百 μm で、しかも高さ方向に大きな寸法を持つ部品をハイアスペクト比マイクロ部品と呼ぶ。これらの部品は機械システムの心臓部として用いられる場合が多く、品質に対する要望は高まる一方である。たとえば、自動車エンジン用燃料噴射ノズル、微細部品加工用の精密金型、マイクロマシン用の微小部品等はその好例である。これらの部品形状を評価をする上で、従来の計測手法は不十分である。なぜなら、機械式タッチプローブは微小化すると強度が低下し接触圧力に耐えられなくなるし、光学顕微鏡は深さ方向に光が届かなくなる欠点がある。半導体評価でよく用いられる SEM や AFM も、平面サンプルを主なターゲットにしているため、高いアスペクト比をもつこれらの部品には適さない。そこで、本研究は従来不可能とされてきたハイアスペクト比マイクロ部品の形状および表面粗さの非破壊検査技術を確立することを目的とする。

手始めに、増沢らの開発したバイブロスキャン法 (VS 法) を、ハイアスペクト比マイクロ部品の試作に用いられる微細放電加工機用に、オンマシン計測ユニットとして適用した。まず、VS 法の原理を図 1 に示す。先端を傘型に加工した微細触針に振動を与え (全振幅 $2\mu\text{m}$)、微細触針と測定対象の間に電圧を印可して、導通電流をモニタする。この時、測定対象と測定触針の先端の距離を h とすると、 h が

振動振幅よりも大きいときは導通は検出されないが、 h が小さくなるにつれ振動周期に合わせた導通が発生するようになり、振動振幅の $1/2$ に等しいときに、導通時間と非導通時間が等しくなる。つまり、導通時間の割合（デューティ比）を計測すれば、触針と測定対象間の距離 h を知ることが可能で、同時に触針をスキャンすることで形状を測定できる。我々は、VS 法の微細触針を松下電器製微細放電加工機に搭載し、微細穴の加工に引き続き、加工形状を機上で評価する実験をおこなった。結果の一例を図 2 に示す。厚さ $200\mu\text{m}$ 、7 種類の金属板に対して同一加工条件で $\phi 100\mu\text{m}$ の穴加工し、穴形状の違いを直径の深さ方向への変化として表示した。同図では入口側（深さ $0\mu\text{m}$ ）から一度広がった穴径が出口付近（深さ $200\mu\text{m}$ ）ですぼむ現象が見られ、加工層の滞留と関係した微細放電加工特有の現象であることが明らかになった。また、アルミニウムの表面粗さが他材料に比べると悪く、放電加工の難しい材料であることを裏付けている。繰り返し測定の結果、測定再現性 $\pm 0.5\mu\text{m}$ を確認した。

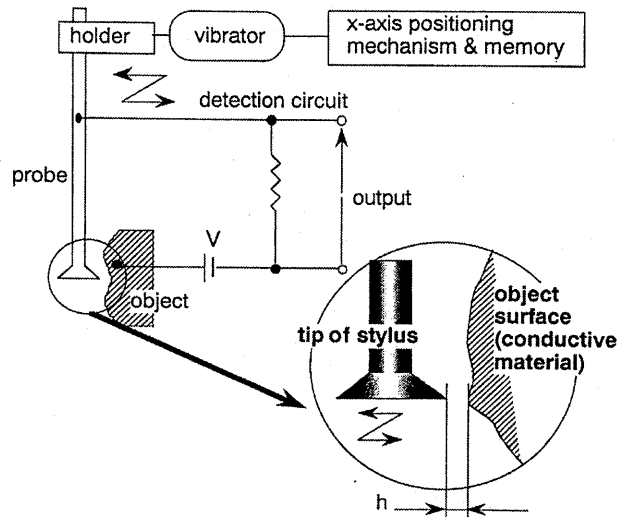


図 1 バイブロスキャンニング法 (金 1998)

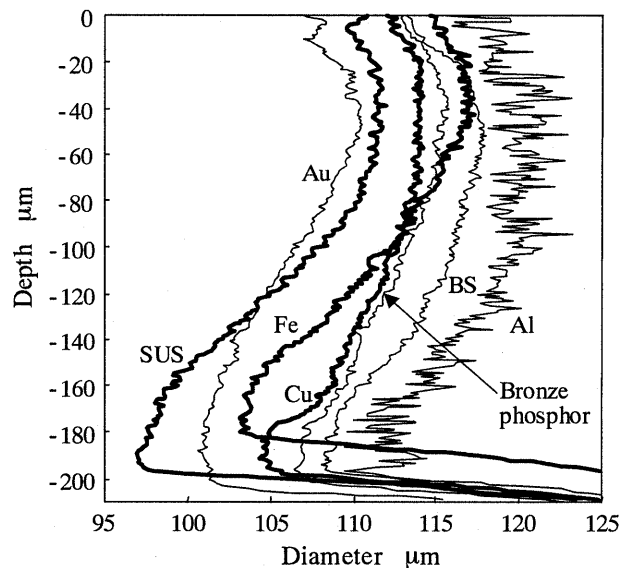
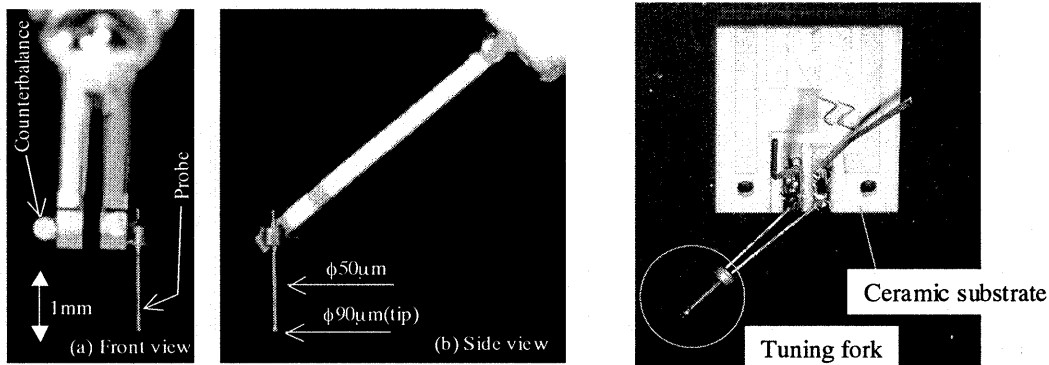


図 2 微細放電加工穴のオンマシン計測

VS 法は検出原理を電気導通によるため、非導電体や厚い酸化膜に覆われた測定対象は計測できない。そこで、電気導通によらない計測方法を開発するために、VS 触針を水晶振動子と組み合わせる試みをおこなった。ここで、水晶振動子に微小プローブを接着した AFM の研究は数多く報告されている。しかし、これらの AFM はプローブを出来るだけ短尺化・軽量化して、プローブの共振周波数を高めると共



(a) Magnified view of tuning fork and probe (b) Tuning fork attached to ceramic substrate

図3 水晶振動子と接着された触針 (TVS センサ)

に、水晶振動子の共振を妨げない工夫がなされていた。これに対して、VS 触針は測定対象に応じて長さが決まるので共振周波数は低く、また、超硬合金製のため Si 系材料に比べて重い。これらの問題を解決して製作したセンサ (TVS センサ) を図 3 に示す。VS 触針の質量の問題はカウンタバランスを取り付けることで解決した。触針のアスペクト比が高くなり、共振周波数が低下してしまう課題は、TVS センサをモデル化し理論検討の結果、最小直径 $6 \mu\text{m}$ (長さ $1200 \mu\text{m}$) の触針まで実現可能であることを示した。TVS センサの共振・共振停止を判別し、センサを測定対象に接近・離脱させる接触サーボを行いながらスキャンすることで形状測定をおこなった。繰り返し測定実験の結果、再現性 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ を確認した。

TVS センサにより非導電体のハイアスペクト比マイクロ部品の測定が可能になったが、TVS センサは検出応答が遅いという課題があった。これは、比較的質量の大きな水晶振動子が共振するため、接触によりエネルギーが散逸するまでに時間がかかるためである。そこで、共振部分が先端の触針部分に限られるようなセンサ (RVS センサ) を開発した (図 4)。同図で、長さ 1mm 、直径 $20 \mu\text{m}$ のはり部分が共振する箇所であり、共振振幅を根元に設けられた圧電薄膜が検出する。共振部

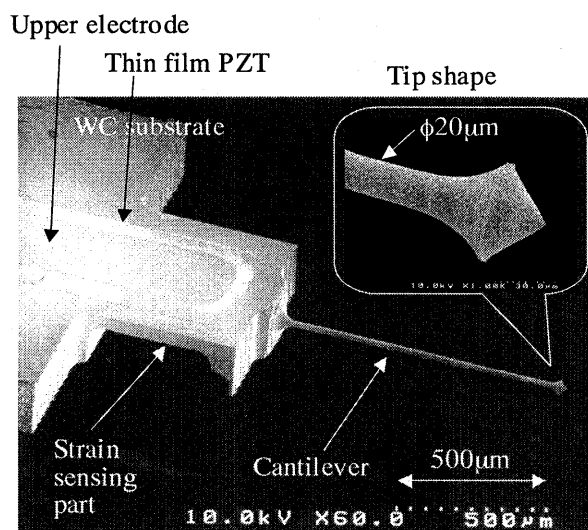


図4 RVS センサの電子顕微鏡写真

分の質量が小さいため、RVS センサの接触・非接触の検出時間は短く、微動ステージで RVS センサを駆動して 500Hz の接触サーボを行うことが可能となった。接触サーボを行いながら RVS センサを測定対象上でスキャンした結果を図 5 に示す。同図はモジュール $29\mu\text{m}$ のマイクロ歯車であり、歯面を $3\mu\text{m}$ 間隔で 100 個の縦断面を計測し、結果を 3 次元レンダリング表示した。歯面の形状・表面粗さが手に取るようにわかり、マイクロ部品の評価における有用性を示している。なお、繰り返し測定実験の結果、再現性 $\pm 0.1\mu\text{m}$ を確認した。

最後に、RVS センサを工業的に実用化するためには、既存の機械計測装置との組み合わせが 1 つのカギとなる。そこで、三次元測定機と RVS センサの結合を試みた。最大の技術課題は三次元測定機が接触検出後も急停止できないオーバートラベルの問題である。RVS センサ触針ははり構造をしているため、撓み方向への押し込みに対しては強いものの、軸方向への押し込みに対しては弱く、わずか $1\mu\text{m}$ の押し込みで座屈する。そこで、RVS センサに制御的に軸方向コンプライアンスを与える機構を考案した。つまり、RVS センサの固定部に高速アクチュエータを仕込み、触針が接触を検出したら RVS センサ自身が軸方向に退避する。この結果、触針はステージのオーバートラベル速度よりも速く退避動作をとることができるので、接触検出の次の瞬間には測定対象から離れる。さらに、高速退避完了後はゆっくりとアクチュエータが伸展し、次の測定に備える。以上の機構により、繰り返し精度 $\sigma = 0.02\mu\text{m}$ のハイアスペクト比マイクロ部品用三次元測定機を実現することができた。本装置は実用化され、ユーザ先で稼働中である。

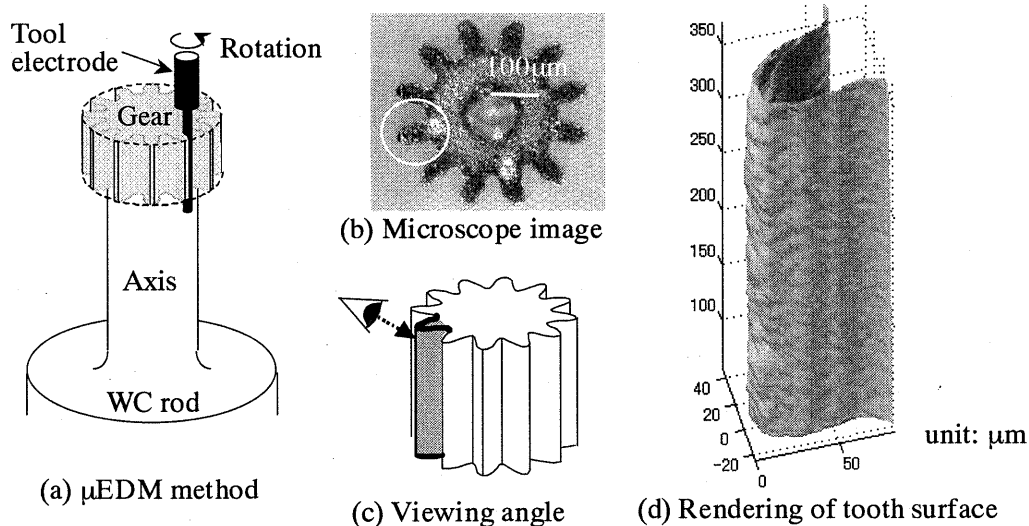


図 5 RVS センサによるマイクロ歯車の歯面測定