無反動シャトルユニットを使用した高効率微細加工の研究*

蛭原建三** 山本 明** 河合知彦** 竹内芳美***

Study on high efficiency machining with reaction-free Shuttle Unit

Kenzo EBIHARA, Akira YAMAMOTO, Tomohiko KAWAI and Yoshimi TAKEUCHI

This paper introduces Shuttle Unit, attachable to an ultra precision milling machine, for high speed machining of micro-grooves and micro-dimples. The shuttle, which is pneumatically supported, is driven by a kind of linear motor at 1.2m/s, reciprocating three times per second. The reaction of the Shuttle is compensated for by its unique reaction-free structure. This unit can machine 3 grooves in a second. The surface roughness of grooves is 1.0nm Ra. Grooves are fabricated sharply without burrs even in the groove pitch of 0.3 μm. It can also machine 200,000 dimples in 4.5 minutes. The error of each dimple's position is less than 1μm even though Shuttle's speed is 1.2m/s. The unit has achieved high efficiency machining and ultra high precision machining at the same time, thus resulting in shortening the machining time of optical parts such as light guiding panel mold and diffraction grating.

Key words: high efficiency, machining, shuttle unit, reaction-free structure, grating, dimple, groove

1. 緒 言

超精密加工が必要とされる分野は年々広がりを見せており、日常的に目にする製品にも使用される頻度が増えている。携帯電話の液晶バックライトに使われている導光板は、数 10~200 μm ピッチで微細な溝や半球状の微細凸形状が多数並んだ形状をしており、これは反転形状の金型を超精密加工し、射出成形で樹脂に転写したものである。導光板の機能は、光源の光を均一に拡散することであるが、数 nm の面精度の不均一さが光学的なムラとして肉眼で見えてしまうこともあり、個々の形状精度だけでなく、全体が一樣に加工されていることが重要とされる^{1)~3)}。加工形状としては、微細溝やディンプルが配列した単純な加工の繰り返しであるが、数が多いために加工時間が数日かかることもある。長時間の加工は、単に時間がかかるだけでなく、周囲温度の変化等の誤差要素も入り易く、前述のような光学的なムラの一因となるため、良品の金型を加工するためには、加工環境の厳密な管理が必要とされる。

本研究では、微細溝と微細ディンプルを高精度かつ短時間に加工することを目的として、シャトルユニットと呼ぶ装置⁴⁾を開発した。この装置は超精密加工機の機上に後付けすることを前提にしており、無反動機構や低発熱の構造を採用することで、汎用の超精密加工機に高速加工の機能を簡便に付加できる。このユニットの開発によって、導光板金型などの加工時間を大幅に短縮できるだけでなく、周囲温度の時間的な変動が加工物の精度に与える影響も抑えることができる。

2. シャトルユニットの構造

2.1 無反動の構造

一般的に超精密加工機は、設置場所の床振動の影響を抑えるため、エアダンパーの上に機械本体が搭載される。したがって、単純に機上に取付けた付加軸を高速駆動すると、その加減速の反動が加工機本体に伝わり、パッシブ方式のダンパーであれば

本体が揺らされ、精密な加工はできない。アクティブ制御のダンパーならば、ある程度の加減速に応答することも可能であるが、あらゆる条件で加減速の影響を打ち消すのは難しい。そこで、シャトルユニットではユニット内で反動を打ち消す機構を採用した。外観を図 1 に示す。基本的にはシャトル、ガイドバー、ベースの 3 つの部分で構成される。特徴的なのは、通常はシャトルの軸受ガイドとして固定されるべきガイドバーが固定されずに、ガイドバーとベースの間で軸受構造を持っている点である。シャトルの加減速をすべてガイドバーが受けることで、図 2 のように、シャトルとガイドバーが常に反対方向に動く。したがって、原理的にはどんなに高速にシャトルを動かしても、その反力がベース部分に伝わることはない無反動の構造となる。

シャトルの重量を m_s 、ガイドバーの重量を m_g 、シャトルの速度を $v_s(t)$ 、ガイドバーの速度を $v_g(t)$ とすると、理想的には運動量が保存されるので、式(1)の関係が成り立つ。厳密に言えばシャトルに接続されたケーブル類などから、シャトルに微小な力加わるが、無視できる程度である。

$$m_s \cdot v_s(t) + m_g \cdot v_g(t) = 0 \quad (1)$$

シャトルのストローク s_s とガイドバーのストローク s_g の関係は、式(1)から、

$$\frac{s_s}{s_g} = \frac{\int_0^{T/2} |v_s(t)| dt}{\int_0^{T/2} |v_g(t)| dt} = \frac{m_g}{m_s} \quad (2)$$

となり、重量に反比例する。したがってガイドバーが重いほど、ガイドバーの移動量が少なくなるのでガイドバーの長さを短くでき、装置がコンパクトになる。本研究で使ったシャトルユニットでは、シャトル 290g に対してガイドバーはおおよそ 10 倍重いので、シャトルのストローク 200mm に対して、ガイドバーは 20mm 移動することになる。

2.2 低発熱・一定発熱による精度の安定化

図 3 にシャトルユニットの断面図を示す。ガイドバーが駆動用の磁石と鉄心を内蔵しており、鉄心から出てくる磁力線をシャトル側のコイルに流れる電流が横切ること、200~300mN の推力を発生するリニアモータである。コイルは駆動用のコイルと

* 原稿受付 平成 18 年 4 月 28 日

** 正 会 員 ファナック(株) (山梨県忍野村忍草 3580)

*** 正 会 員 大阪大学 (大阪府吹田市山田丘 2-1)

Fig.1 Configuration of Shuttle Unit

Fig.2 Principle of reaction-free structure

検出用のコイルが2重に巻かれており、シャトルが移動すると検出用コイルに逆起電力が発生する。この逆起電力の符号からシャトルの駆動方向を検出し、シャトルの移動方向に常に推力が発生するように、駆動用コイルに電流を流す制御をしている。一般的な送り機構で高速な往復運動をさせようとすると、方向反転時に大きな推力を必要とするため、必然的に発熱が大きくなる。しかし、ある一定のストロークの間を往復運動する場合はその限りではない。ばね的な要素でシャトルを方向反転させてやれば、エネルギーを消費することなく、ほぼ元の速度を維持して進行方向を反転させることが可能である。

そこで、永久磁石による反発を利用し、方向反転も非接触とした。図3に示すように、方向反転のための永久磁石は、反転時にモーメント力が発生しないように、対称に配置している。磁石の反発力は距離の2乗に反比例するので、ごく近傍にまで近づかないと強力な反発力は得られないが、同時に衝突の危険が出てくる。本構造であれば磁石同士が衝突することなく、強力な反発力が得ることが可能である。シャトルはストローク端の10mmほどで一気に反転するため、このときの加速度は10Gに達する。この構造を採用することにより、3Wという低消費電力で1.2m/秒、毎秒3往復という高速駆動が可能となる。低発熱であれば、機構部の熱的な変位を抑えることができるが、超精密加工で重要なのは、熱的な変位が少ないことよりも、むしろ熱的な変位が変動しないことである。本ユニットでは、駆動電流は駆動方向に応じて±が変わるだけで、電流の大きさは常に一定である。したがって、駆動による発熱は常時3Wで完全に一定になっている。一方で、この駆動方式は推力が一定なので、加工反力の大きさで速度が変動することを意味するが、同じ形状を繰り返し加工する導光板金型や回折格子の加工においては、速度変動による加工誤差よりも、発熱一定による繰り返し精度の高さの方が大きな利点となる。また、軸受はすべて空気軸受になっているので、高速駆動時も摩擦による発熱は極めて少なく、振動のない滑らかな直線運動が可能である。

Fig.3 Cross section of Shuttle Unit

Fig.4 Tool positioning mechanism

シャトルに加わる駆動方向の加工反力は、シャトルの方向反転時にガイドバーに伝わる。したがってガイドバーには加工反力に対向する力を加える必要が出てくるが、本ユニットが加工対象とする微細加工では反力はわずかに数10mN程度なので、強い力を発生させる必要はない。そこで、図3に示すように、ベースに磁石を配置してガイドバー側の磁石との間に弱い反発力を生じさせ、ガイドバーを中心に保持する弱い力を常時加える。この構造であれば、急激に立ち上がる加工反力がシャトルに加わっても、ガイドバーを介して弱い力が緩やかにベースに伝わるだけとなる。外見上は、ガイドバーが往復運動する位置が加工反力で押された分だけシフトすることになる。

前述のようにコイルに流れる電流は、向きのみを制御しており、シャトルの移動方向と同じ向きに常に推力が発生している。何の抵抗要素もないと、シャトルが加速し続けて高速になる一方、僅かな加工反力でシャトルの速度が大きく変わってしまい、駆動が不安定になる。そこで、シャトル側に搭載された反転用の永久磁石が金属製のガイドバー上を移動することにより発生する渦電流を抵抗要素として利用した。渦電流は速度が大きくなるほど推力に抵抗する力が大きくなるので、渦電流による抵抗と推力が一致したところで、シャトルの速度が安定する。この状態で、数10mNの加工反力が加わってもシャトルの速度が大きく変化することはない。

シャトルユニットの1.2m/sという速度の大きさだけで見れば、一般的なリニアモータ加工機で到達可能な速度域であるが、200mmのストロークをほぼ一定速度で毎秒3往復させるほどの加速度を3Wの電力で得ることは、通常のリニアモータでは難しい。本ユニットは、非常に単純な原理で高精度と高速駆動を両立させた加工装置を実現している。

2.3 工具の切込み機構

本ユニットは一方方向の引切り加工を行うため、工具の切込み量を変化させる図4の機構をシャトルの下部に備えている。両端固定の板バネ構造がピエゾ素子にプリロードをかけており、この板バネに工具が取り付く。ピエゾ素子の応答速度を有効に使用して、バイトの切込み量を高速に制御するには、ピエゾ素子が駆動する部分の質量をできる限り小さくすることが必要で、そ

Fig.5 Actual test cut

Fig.6 Surface roughness

のために必要最低限の寸法とした。また、高速でバイトを駆動した場合も、上下方向以外の動きを生じないためには、板バネ等がピエゾに対して対称の構造となるのが望ましい。ピエゾ素子のストロークで、加工可能な深さも決まってくるが、ストロークが長くなるほどピエゾ素子自体も長くなり、バイトの取付け位置がシャトルから突出した位置となる。一方シャトルの軸受剛性という観点から見ると、バイトの突出し量が大きいくほど、切削反力によりシャトルに加わるモーメント力が大きくなる。特に空気軸受は、モーメント方向の力に対しては極端に剛性が弱くなる特性があるため、バイトの突出し量は最小が望ましい。一般的な導光板の溝深さなどから、ストローク $6\mu\text{m}$ のピエゾ素子を採用し、シャトル側に掘り込みを作って、そこにピエゾ素子を入れることで、工具の突出し量を抑えるようにした。共振周波数は実測値で約 10kHz となっており、この周波数以下でピエゾ素子を駆動する。

3. 平面および微細溝の加工試験

3.1 平面加工による面精度の評価

本ユニットを超精密5軸加工機(FANUC ROBONANO α -0iB)上に取付け、実際に加工を行って性能を評価した。加工試験の様子を図5に示す。まず、最も基本的な加工となる平面加工を行った。ワークの材質は銅(膜圧 $200\mu\text{m}$ のメッキ層)、工具は $R5\text{mm}$ の単結晶ダイヤモンドバイト、フィード方向は機械本体軸を使い、 1.5mm/min で連続的に送っている。 1.5mm/min の場合、シャトルは毎秒3往復するので、フィード方向の加工ピッチは $8.3\mu\text{m}$ で、理論面粗さは 1.7nm Rz となる。加工面について、加工方向とフィード方向の面精度を白色干渉計(Zygo NewView)で測定した結果を図6に示す。加工方向は、 3.9nm Rz 、 0.66nm Ra となっており、良好な精度が得られている。数 nm オーダのうねりが見られるが、これは機械的なナノオーダの微小振動がそのま

Fig.7 Overall and microscopic view of the work ($70\mu\text{m}$ pitch groove) Fig.8 Surface roughness of $70\mu\text{m}$ pitch groove

ま加工面に現れているものと推測される。フィード方向は、 12.7nm Rz 、 2.3nm Ra となっており、加工方向ほどではないが良好な値と言える。やや周期的にも見えるうねりがあるが、この原因も同様に機械的な微小振動に関係していると思われる。

この平面加工の結果から、本ユニットによりナノ精度の加工が十分可能なことが示された。今回は5軸機上での評価となったが、より軸数の少ない機械に搭載することで、機械的な微小振動の影響も減るため、更に良好な加工面が得られると期待される。

3.2 直線溝の超高速加工

次に導光板金型などで加工される非対称の微細溝について加工試験を行った。加工に使用した工具は開き角 133° の単結晶ダイヤモンドバイト、ワークは Ni-P (膜圧 $200\mu\text{m}$ のメッキ層)、サイズは $100\times 100\text{mm}$ となっている。溝ピッチは $70\mu\text{m}$ 、溝深さは $5\mu\text{m}$ 、溝本数は1428本となる。ピックフィードは機械本体軸で行うが、平面加工の場合と違い、工具が切削している間は停止させ、工具が逃げている間に次の溝列に移動する。

加工したワークと顕微鏡写真を図7に示す。目視による評価では、ムラのない均一な加工面が得られた。切込みを $1\mu\text{m}$ で加工しており、面の加工時間は8分なので、周囲環境の変化等に影響されることのない高速加工が実現できたといえる。機械本体軸の最高送り速度は 500mm/min なので、本体軸だけで同様の加工を行うと、10時間にかかる加工である。片側の斜面は垂直に近いこぎり型の溝形状となる。稜線にバリ等は見られず、シャープな加工形状が得られている。加工方向に測定した面粗さを図8に示す。 6.2nm Rz 、 1.0nm Ra で、良好な粗さで加工されている。

回折格子は、導光板よりも溝ピッチが細くなり、数 μm オーダとなる。同じ面積を加工する場合、溝ピッチが細くなれば、その分加工時間が長くなるので、高速・高精度を両立したシャトルユニットのメリットが活かされる加工となる。回折格子の加工試験として、工具は開き角 90° の単結晶ダイヤモンドバイト、ワークは Ni-P で、 $30\times 45\text{mm}$ の面積を加工した。加工したワーク全面とそのSEM写真を図9に示す。溝ピッチは $1\mu\text{m}$ 、溝深さは $0.5\mu\text{m}$ 、溝本数は30000本となり、総加工時間は3時間である。機械本体軸のみで加工した場合は100時間を要するので、この間の環境変化の影響を抑えるのは難しい。稜線部分

Fig.9 Overall and microscopic view of the work (1 μ m pitch groove) Fig.10 SEM view of 0.3 μ m pitch pyramid

に僅かではあるが、バリが見えるものの、1 μ mピッチの溝加工についても、良好な加工結果が得られた。シャトルユニットを用いてミクロンオーダーの溝は、問題なく加工できることが、実証できた。

本ユニットの場合は、ストロークが200mmで固定となるため、ワークサイズがシャトルのストロークに近いほど加工効率が良い。また、ワークサイズが小さければ、複数のワークを並べて同時に加工する方法も加工効率を更に上げる手段となる。

3.3 サブミクロンピッチの溝加工

光学装置で使用する光源の短波長化に伴い、サブミクロンピッチの溝加工についての要求も多くなってきている。1 μ mピッチの溝加工の結果から、更にピッチを狭めることも可能と思われるため、加工試験を行った。使用した工具は1 μ mピッチの溝加工と同じもので、ワークもNi-Pを使用した。溝ピッチ0.3 μ mで加工して、更に本体軸でワークを90度回転させてから加工することで、溝を交差させて、ピラミッド形状とした。加工結果のSEM写真を図10に示す。正確な深さは測定できていないが、0.15 μ m程度になっていると思われる。当初、加工したものは、図9のようなバリも見られたが、ゼロカットをすることでバリの無いエッジを得ることができるようになった。

機械本体軸のみを使用して時間をかけて加工した場合は、僅かに切込み深さが変化しただけでも溝が交差しなくなってしまうため、長時間の精度の安定性が求められる難しい加工となるが、シャトルユニットの高速加工により、正確に溝が交差していることが図10から分かる。しかし、工具寿命の問題もあり、現在のところ狭い面積の加工に限られている。大面積にサブミクロンピッチの加工を行うのは、今後の課題である。また、更に細かいピッチについても加工できる可能性があり、0.3 μ mピッチが限界ではないと思われる。

3.4 任意パターンの超高速加工

これまで一定深さの溝加工について述べてきたが、本ユニットは、工具の切込み機構にピエゾ素子を採用しているため、1本の溝を加工している間に、工具の切込み量を高速で変化させることが可能である。この方法により、任意のパターンを作りこむことができる。しかし、本ユニットでは位置、速度の制御を行っていないので、プログラムで切込み量を制御して正確な

Fig.11 Machining method of arbitrary pattern

Fig.12 Landscape drawn on the flat workpiece surface

位置に加工するのは難しい。そこで、加工プログラムを用いることなく、リアルタイムで加工信号を生成する方法を採用した。

図11に示すように、加工形状のモデルを用意し、それをシャトルに取付けたセンサで読み取り、その信号を元にピエゾを駆動して切込み量を変化させる。この場合、シャトルにセンサと工具が取り付けられているので、両者の位置関係がずれることがない。したがって、原理的にはシャトルの速度が変化してもモデルの通りの加工が可能となる。厳密に言えば、センサが信号を読み取ってから工具が動くまでは電気的な遅れ Δt があり、シャトルの速度変化 Δv があれば、 $\Delta v \cdot \Delta t$ が位置の誤差として現れるが無視できるオーダーである。形状を読み取るセンサは非接触が望ましく、凹凸を読み取るのであれば静電容量変位計、明暗を読み取るのであれば光電センサ等を用いる。また、センサの応答速度や、読み取りのスポット径も加工形状に影響してくる。

加工したワークとその顕微鏡の拡大写真を図12に示す。最初にパターン部がその他の部分よりも5 μ m高くなるように50 μ mピッチで溝の加工を行い、その後5 μ mピッチで加工を行うことでパターン部のみ回折格子とした。この加工では、モデル形状をデジタルで読み取っただけなので、パターン部の高さは一定であるが、例えば明暗の階調や凹凸の高さをアナログで読み取れば、任意の切込み深さを、連続的に変化させたパターンの加工も可能である。

4. ディンプルの加工試験

4.1 ディンプルの超高速加工

本稿の冒頭で述べたように導光板金型には、溝形状以外にディンプル形状のものがある。一般的な加工方法は一つ一つのディンプルに対して位置決めしてミリングで加工するが、溝形状と同様に数が多いために時間がかかる。これをシャトルユニットで加工する場合は、図13のようなパイトの動きとなる。前述の任意パターン加工の応用となるが、より正確な位置に加工する必要がある。そこで図14のように、シャトルユニットにリニアスケールを搭載して、ディンプルの加工位置を精密に制御する方法を採用した。

通常であれば、リニアスケールは駆動の位置・速度を制御するために使われるが、本ユニットは元々位置・速度を制御できるシステムではないため、スケール信号を加工位置の基準信号にのみ使用し、駆動は制御していない。スケール信号そのまま

Fig.13 Tool path of dimple machining

Fig.14 Shuttle Unit with linear scale

は、パルス数も多く加工信号には使えないので、図 15 に示すようにパルス数を電氣的に間引き、この信号をトリガにして、ピエゾ素子に工具の駆動信号を出力する。スケールパルスの間引く割合を変えることで、スケールパルスの分解能精度で、ディンプルの加工間隔を変えることができる。前述のようにシャトルの速度ムラと信号処理の遅れ量の積 $\Delta v \cdot \Delta t$ が加工位置の誤差となるので、図 15 の信号生成プロセスは、できる限り高速な信号処理で行うのが望ましい。

最初にディンプルの位置がどの程度ずれるのかを見積もるために、ピックフィードを $2\mu\text{m}$ ピッチにして加工した。この場合は、ディンプルがつながるので R 溝になるが、ディンプルの加工位置がミクロンオーダーでずれるならば、加工される R 溝のエッジにそのずれ量が現れるはずである。加工試験の結果を顕微鏡で観察した写真を図 16 に示す。R 溝のエッジは直線になっている。微分干渉顕微鏡によるエッジの拡大写真から、R 溝内の $2\mu\text{m}$ のピックフィードによる横縞も整然と並んでおり、毎回の繰り返し精度が高いことがわかる。他にいくつかの方法で確認しているが、ディンプルの加工位置の誤差は $1\mu\text{m}$ 以下であり、導光板金型としては十分な精度を確保できている。

次に、実際に使用される導光板金型に近い千鳥格子の配置でディンプルの加工を行った。工具は先端 $R65\mu\text{m}$ のダイヤモンドバイト、ワークの材質は Ni-P、切込み $2\mu\text{m}$ 、加工方向に $160\mu\text{m}$ ピッチで、 $30 \times 60\text{mm}$ の面積に加工を行った。加工したワークの写真とその顕微鏡写真を図 17 に示す。写真では、ピックフィードが等ピッチに見えるが、実際には各行ごとに 5nm ずつピックフィードを変えている。ワーク全体では $50 \sim 90\mu\text{m}$ の範囲でピックフィードが変わっているのでディンプルの密度は場所によって違う加工になっている。ディンプルの加工数は約 20 万個であるにもかかわらず、加工時間は 4.5 分である。通常のミリング加工で 1 秒 1 個のペースで加工した場合は、55 時間かかる加工となり、700 倍以上の加工速度が実現できている。また、工具寿命に関しては、数 100 万個まではチッピング等が起きないので、頻繁に工具を交換する必要はない。

今回加工したディンプルは、拡大写真のように歪んでおり、真円ではない。誤差要素としては、シャトルの速度と工具の

Fig.15 Signal generation

Fig.16 Microscopic view of test cut result to estimate the error

Fig.17 Overall and microscopic view of dimples

切込み速度の関係で、ディンプルが楕円になることや、工具の切込み方向が正確に真下ではないために、非対称の形状になることが考えられる。しかし、導光板金型に用いるディンプル形状としては、現状でも十分な精度といえる。また、図 13 のような工具の動きを数 kHz の速度で行うと、必ず正弦波状の動きになるので、理想的な加工ができたとしてもディンプルの形状は球面にはならない。

4.2 ディンプルパターンの超高速加工

これまで、ピックフィードの量を変えるだけの単純なディンプルの配置であったが、LED などの点光源の光を導光板で一緒に拡散させるためには、緻密な光学設計に基づきディンプルが配置される必要がある。そこで、任意のパターンでディンプルを配置する試験加工を行った。工具の駆動信号は、図 15 の信号を間引く間隔をプログラムで変化させ、シャトルの往復動作ごとに、間引き方のパターンを変えることで行った。図 18 に「F」をディンプルのドットパターンで加工した結果を示す。この加工自体は、単純なパターンの繰り返しなので、短いプログラムの繰り返しで可能であるが、全てのディンプルを任意に配置しようとすると、プログラムは膨大な長さになってしまう。また、シャトルが常に一定速度で駆動されているのであれば、加工信号は一般的な任意波形生成装置を使って時間軸で波形を出力すれば、正確な位置に加工される。しかし、実際には速度が一定ではないので、スケールの信号をカウントして、それにタイミングをあわせて加工信号を出力しなければならない。したがって、スケール信号が $1\mu\text{m}$ ピッチであれば、 1MHz 以上の高速カウントが必要で、高速カウントとプログラムによる高速な信号出力の制御が可能な専用の装置が必要となる。

ディンプルのパターン加工をもっと簡便な方法で行うため、前述した図 11 の加工方法と、スケール信号によるディンプル加工を組み合わせる方法を考案した。信号の生成方法を図 19 に

Fig.18 Overall and microscopic view of repeated dimple pattern

Fig.19 Signal generation for masked pattern

Fig.20 Overall and microscopic view of patterned dimples

示す。スケール信号を間引いた信号とセンサからの信号とのAND演算の結果を加工に使用する。こうすることで、センサの信号の入力に対応して、ディンプルの加工信号にマスクがかかり、プログラムを作成することなく、任意パターンでディンプルを加工することができるようになる。

図20に示す加工では、「超精密」「超高速」という文字を紙に印刷し、それをマスクパターンとして、ディンプルで加工した。工具は先端R18μmのダイヤモンドバイトを使用し、ワークの材質はNi-P、切込みは3μmである。ディンプル数は約60000個、加工時間は12分となっている。非常に簡便な方法であるが、印刷された文字を正確に再現した良好な加工ができている。精密なマスクパターンを用意することができれば、導光板金型のような精密なディンプル配置を必要とするものにも応用できる。

4.3 本体軸と組み合わせた加工

本ユニットの切込みのストロークは6μmのため、加工可能な形状には制限はあるが、機械本体軸の動きと組み合わせることで、加工形状の自由度を広げることができる。図21は300μmピッチ、深さ150μmのピラミッド形状を加工したもので、図10のピラミッド形状と比べると、1000倍の大きさとなる。機械本体軸を使ってシャトル本体を切込み方向に動かすことで、 piezo素子のストローク以上の深さでの加工も可能となる。

図22は40μmピッチのディンプルの加工例である。シャトルの速度は1.2m/秒なので、単純に考えると30kHzでpiezoを駆動しないと40μmピッチにはならないが、piezoの応答速度、発熱の面から、30kHzの駆動は不可能である。そこで、piezo素子は7.5kHzで駆動し、160μmピッチの加工をシャトルで行い、シャトルが1往復する度に本体軸で40μmずつ加工方向にワークを動かすようにした。シャトルが4往復すると、40μmピッ

Fig.21 SEM view of 300μm pitch pyramid

Fig.22 Microscopic view of 40μm pitch dimples

チのディンプルが加工されることになる。この方法を使えば、最小加工ピッチの制限がなくなり、密度の高いディンプル加工が可能になる。

5. 結 言

本研究の結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 無反動構造、低発熱構造を採用した高速加工装置であるシャトルユニットを開発した。1.2m/sの速度で200mmのストロークを毎秒3往復で、工具はストローク6μmをpiezo素子で高速駆動して切込める。
- (2) 微細溝を毎秒3本の速度で加工し、加工面粗さ1.0nm Raを得た。また、0.3μmピッチ、高さ0.15μmのピラミッド形状を加工し、バリのないシャープなエッジを得た。
- (3) 微細ディンプルを加工し、約20万個のディンプルを4.5分で加工できた。リニアスケールの信号を加工位置の基準とすることで、ディンプルの位置誤差を1μm以下にできている。
- (4) 工具を駆動する信号を、プログラム制御またはシャトルに取付けた非接触センサでマスクすることで、ディンプルを任意のパターンで加工できる。

参 考 文 献

- 1) 辻内順平:ホログラフィ実用技術とその展望, 精密工学会誌, 56,10(1990)1771.
- 2) LCD バックライト・部材市場の現状と将来展望, 矢野経済研究所 (2005).
- 3) T. Ide, H. Numata, H. Mizuta, Y. Taira, M. Suzuki, M. Noguchi, Y. Katsu: "Moire-Free Collimating Light Guide with Low-Discrepancy Dot patterns", Digest of Technical Papers (Society for Information Display, 2002), 1232.
- 4) T.Kawai, K.Ebihara, Y.Takeuchi:Ultraprecision Straight Microgrooving with Pattern by Means of a High Speed Shuttle Unit, Proc. of 5th Int. Conf. of EUSPEN (2005) 607.