



T. Moriwaki

金型加工用工作機械の技術開発動向

森脇 俊道*

1. まえがき

プレス加工や鍛造などに代表される各種塑性加工，鋳造，射出成型など各種金型を用いた加工は，高精度，高能率で多量生産を可能にする加工法として，機械産業において広く活用されている。金型には高い加工精度に加えて良好な仕上げ面粗さが求められるため，これまでは比較的企業規模の小さな工場において，技能者によって製造されることが多かった。また金型製造には高度な加工技術が要求されるため，金型の加工技術がその国の機械加工技術を象徴するものであった。近年，金型加工には高精度・高品質に加えて短納期，低コストが求められる，金型産業に大きな変革をもたらされつつある。

金型製造における技術的な問題としては，1) 複雑な形状が増え，CAD/CAM を駆使した加工が求められることから，技能から技術への転換，2) 工作機械と工具を含む切削加工技術の進歩による加工法の転換，3) 各種光学部品などの製造に必要な超精密マイクロ金型の加工技術の確立，などがあげられる。本稿ではこのうち主として2) と3) の観点から最近の技術について紹介し，将来展望を試みる。

2. 金型加工における切削技術の重要性

金型に用いられる材料は焼入れ鋼や超硬合金などいわゆる難削材であり，切削加工が困難であることが多い。そこで金型の加工には被削材の硬度によってあまり影響を受けない放電加工が多用され，現在でも放電加工の必要性は高い。こうしたことから金型の製造において切削加工が用いられるのは，調質前の粗加工が主であった。一方で近年，焼入れ鋼など難削材の切削加工技術が進歩したため，一部の磨き加工を除いて，切削加工で金型が製造されることが多くなった。その基礎となったものとして，以下のような技術進歩があげられる。

- 1) 高速，超高速主軸に代表される工作機械要素技術の進歩，
- 2) 5軸加工機など多軸複合加工機の普及とその運用を支援するCAD/CAM技術の進歩，
- 3) 焼入れ鋼の切削を可能とするCBN工具など工具技術の進歩，
- 4) 高速主軸回転，小切り込み，高送りによる小径エンドミル工具による難削材の加工など，切削加工技術の進歩。

3. 最近における工作機械技術の進歩

3.1 工作機械の要素技術

上述したように最近における工作機械要素技術の進歩は著しい。特に高速主軸についてみれば，高速マシニングセンターの最高主軸回転数が $50,000\text{min}^{-1}$ を超えるものもあり，DmN値についてみてもこれまでの目安とされていた $1,000,000$ をはるかに超えて， $2,000,000$ 近くのものもある。その多くはセラミック玉軸受と特殊な潤滑法を採用したものである。一時期期待された磁気軸受は，コスト/パフォーマンスの点で市場で広く使われるには至っていない。

主軸と並んで重要な送り軸駆動には，従来のボールねじ駆動に加えてリニアモータ駆動の採用が広がっている。リニアモータ駆動は高速性に加えて，バックラッシュなどによるロストモーションがないことなどから，高精度の駆動系に向いており，最近では後述する超精密工作機械の駆動系に広く用いられつつある。5軸マシニングセンターや複合加工機においては，高速，高精度の回転テーブルが使用されることが多いが，そのためのダイレクトドライブモータの開発も進んでおり，直線駆動，回転駆動ともに最近における駆動系の進歩は著しい。

3.2 多軸加工機による金型加工技術

最近では3次元的に複雑な形状をした金型が多く用いられるため，これまでのいわゆる直線3軸のマシニングセンターよりも回転軸を付加した4軸，あるいは5軸マシニングセンターが広く用いられつつある¹⁾。しかしながら現実問題として5軸同時制御加工はプログラミングが複雑であり，必ずしも広く用いられてはいない。現状で広く利用されている技術はいわゆる3+2軸加工と呼ばれるもので，あらかじめ回転の2軸を利用して，工具に対する工作物の姿勢を変えておいて通常の3軸加工を行うものである²⁾。この方法の主たる利点は，図1に示すように，

- 1) エンドミル工具のオーバーハング長を短くすることができるため，重切削が可能である，
- 2) 深い壁の面や穴を容易に加工することができるため，加工時間の短縮が図られる，
- 3) ボールエンドミルの場合，最適な工具位置を使用して加工を行うことができるため，切削条件の最適化が図られる，
- 4) ジグや取り付け具の簡素化が図られる，

などである。3+2軸加工と通常の5軸加工を比較すると図2のようになる。4軸あるいは5軸同時制御加工においては，CAD情報からCAM情報を作るためのCAD/

*摂南大学工学部 マネジメントシステム工学科 教授

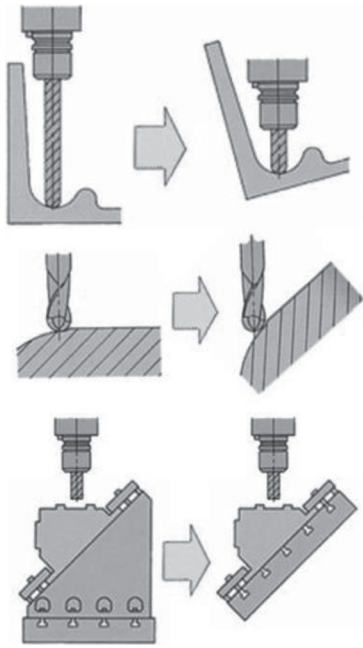


図1 3+2軸加工の利点

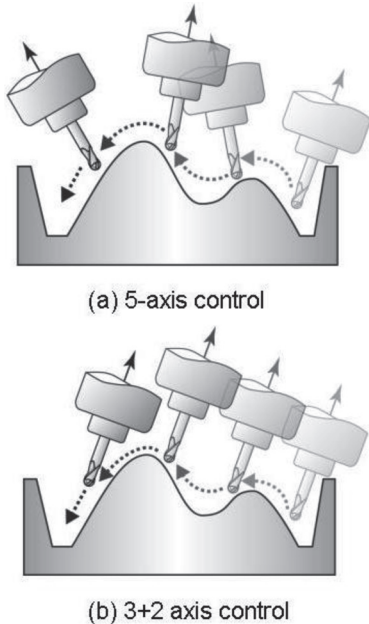


図2 3+2軸加工と5軸加工の比較

CAM 技術が重要となる。ここで課題となる事項をあげると以下のとおりである。

- 1) カッターパスの創成,
- 2) 同時加工の制御,
- 3) 最適な加工法の選択,
- 4) 衝突防止,
- 5) 工具姿勢の制御,
- 6) ポストプロセッシング。

3.3 多軸複合加工機の動向

最近では、X、Y、Zの直線運動軸を有する通常の3軸制御マシニングセンターに対して、各軸周りの回転運動軸A、B、C軸の内2つの回転軸を有する5軸制御マシニングセンターが広く市場に出回り、金型加工に利用されている。最も一般的な5軸制御マシニングセンターは図3に示

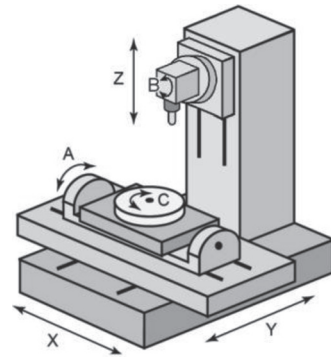


図3 代表的なマシニングセンターの制御軸

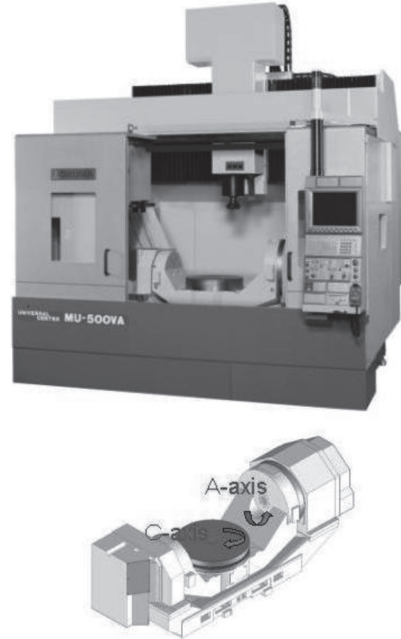


図4 5軸制御マシニングセンターの例（オークマ）

すA軸およびC軸を具備する形式のものである。縦型と横型を比較すると縦型のマシニングセンターが圧倒的に多い。代表的な5軸マシニングセンターの例を図4に示す。5軸マシニングセンターとしては、この他多くの形態、寸法のもので生産され市場に出荷されており、マシニングセンターの主流になりつつある。

複雑な形状の金型加工を行う新しい形態のマシニングセンターとして、パラレルマシンがある。これは従来の工作機械が、一つの運動軸の上に別の運動軸を重ねたいわゆるシリアル型になっているのに対して、例えば図5に示すように、6本のストラットの伸縮で主軸にX、Y、Z、A、B、Cの運動を与えるパラレル機構を応用したものである。パラレルマシンにも多くの種類があり、図5に示すように6軸の運動をパラレル機構で実現しているものの他、平面内の運動のみをパラレル機構を利用して実現し、従来のシリアル機構と組み合わせたもの、工作機械の一部のみにパラレル機構を応用したものなど、多くの種類の工作機械が開発されている。実用されているパラレルマシンの例を図6に示す。パラレルマシンは比較的単純な機構で複雑な運動を実現することが可能であるが、回転運動における運動範囲が狭い、従来型の工作機械に比べて床面積当たりの加工範囲が狭い、複雑な座標変換

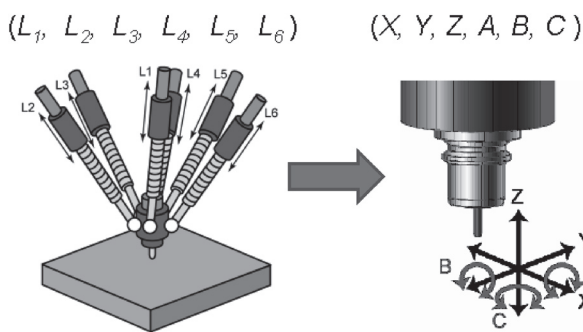


図5 パラレル機構と座標変換

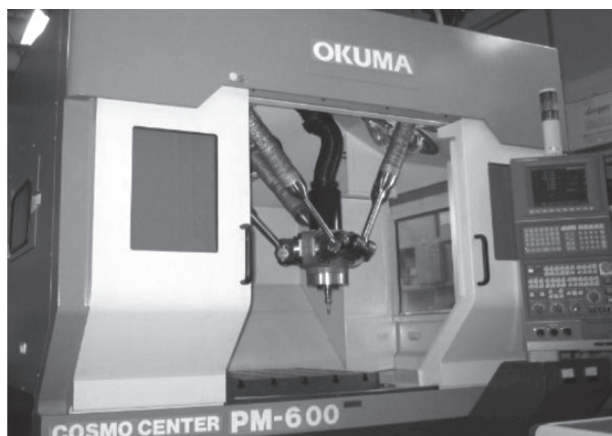


図6 パラレルマシンの例（オークマ）

計算を実時間で行う必要がある、などの問題点が指摘されている。しかしながら用途を限り、特徴を生かせば今後応用範囲はさらに広がるものと考えられる。

4. 超精密金型加工

4.1 超精密マイクロ金型の動向

最近では各種電子デバイス、光学機器などを中心に様々なレンズやミラーが数多く使用されている。これら光学部品の多くは、プラスチックの射出成型、あるいはガラスのホットプレス成型で多量生産される。そこで使用される金型には、高い加工精度と極めて良好な仕上げ面粗さが要求される。こうした光学部品の生産に使用される金型に要求される項目と要求内容は表1のようにまとめることができる。最近では、光学部品のコンパクト化に伴う金型のマイクロ化や、使用する波長の短波長化に伴う精度、仕上げ面粗さに対する要求の高度化、自由曲面を含む形状の複雑化、超硬合金など金型材料の難削化など、極めて高度な加工技術が要求されるようになってきている。そのため後述するように、超精密工作機械のみならず新たな超精密加工法や超精密加工に適した工具の開発が進められている。

表1 光学部品用金型に要求される項目と要求内容

| 項目 | 要求内容 |
|-------------|---|
| 形状 | 球面→非球面→非軸対象→自由曲面 |
| 形状精度、仕上げ面粗さ | マイクロメートル (nm) → ナノメートル (nm) |
| 工作物材料 | 軟質金属（無酸素銅）→ 硬質金属（焼入れ鋼）→ 硬脆材料（超硬合金、セラミックス） |

4.2 超精密金型加工機の動向

超精密工作機械は一般のマシニングセンターのような汎用機とは異なり、用途が限られること、極めて高価であることなどの理由により、その市場は比較的小さく、またメーカーの数も少ない。しかしながら超精密工作機械には最高の設計・生産技術が要求されることから、工作機械メーカーにとっては技術の頂点を示す工作機械として位置付けられる面もある。

超精密工作機械の要素として最も重要な主軸には、高い精度を実現することが可能な静圧軸受が用いられる。静圧を発生する媒体として空気あるいは油が使用されるが、その特性を比較すると表2のようになる。

表2 空気静圧軸受と油静圧軸受の特性比較

| 項目 | 空気静圧軸受 | 油静圧軸受 |
|---------|--------------------|---------------|
| 回転速度 | 高速回転可 | 比較的低速 |
| 剛性、負荷能力 | 相対的に低い | 高い |
| 振動減衰能 | 低い | 高い |
| その他 | 多孔質型、オリフィス型など多種類あり | 発熱防止、油温の制御が重要 |

直線案内としては、すべり案内、転がり案内、静圧案内が用いられるが、空気、あるいは油の静圧案内が用いられることが多い。空気と油の特性の相違については、表2と同じように考えることができる。直線駆動方式としては、ボールねじ駆動、静圧ねじ駆動、リニアモータ駆動があるが、最近ではリニアモータ駆動が多く利用されている。特殊な駆動法として静圧ねじ駆動があるが、この方式を採用しているメーカーは限られている。

最近生産されている超精密工作機械は複雑な形状に対応することができるよう5軸あるいは6軸制御のものが多い。工作機械の形態としては様々のものが生産されている。また超精密工作機械はその精度を発揮するために、一般に様々な防振対策、熱変形対策が施されている。代表的な超精密工作機械の例を図7に示す。

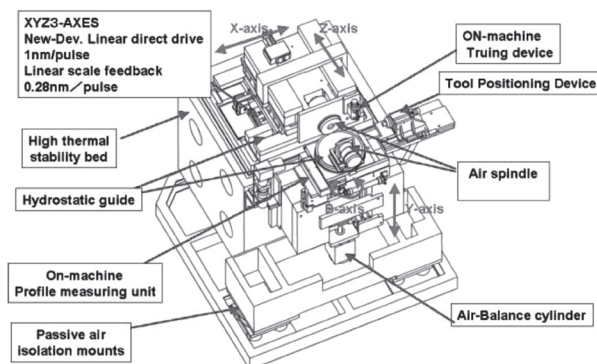


図7 超精密工作機械の例（トヨタ工機）

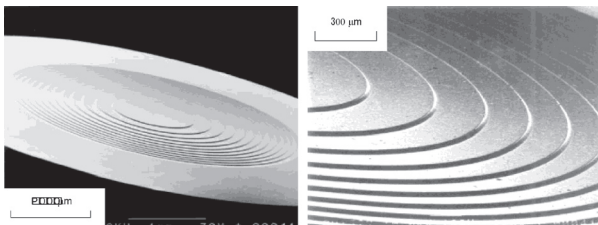
上述したように、超精密工作機械は特殊な工作機械であるためその市場はあまり大きくはない。しかしながら、今後省エネルギーのために白熱電灯や蛍光灯に代わってLEDが一般に使用されるようになると、そのために必要な光学部品を大量生産するための金型が必要になると考えられることなどから、近い将来簡便な超精密工作機械

が数多く生産されることも予想される。

4.3 超精密金型加工の事例

超精密金型は一般に極めて鋭利に研磨された単結晶ダイヤモンド工具を用いて加工される。しかしながら、ダイヤモンド工具で焼入れ鋼を切削することは通常不可能であることから、一般にプラスチック成形に使用される金型は基本的に無酸素銅で作られ、その表面に硬質のニッケルリンメッキを施して、ダイヤモンド工具で仕上げ加工を行う方法が取られている。

近年焼入れ鋼の超精密ダイヤモンド切削を可能にする技術として、超音波振動切削が注目を浴びている。特に筆者らが開発した超精密超音波楕円振動切削法は焼入れ鋼の超精密加工法として応用が広がりつつある。超音波楕円振動切削の原理と特徴については論文³⁾に譲るとして、実験室で加工された焼入れ鋼の金型の一例を図8に示す。



被削材: 焼き入れステンレス鋼(硬度:HRC 55)

溝深さ: 20μm

溝ピッチ: 120 - 350 μm

仕上げ面粗さ測定結果: 0.08 μmRy

図8 超音波楕円振動切削による金型の加工例

携帯電話のカメラなどに利用されるガラスレンズは、ホットプレスによって多量生産される。この場合に使用される金型は高温・高圧に耐えることができる超硬合金や、セラミックスが用いられる。これらの硬脆材料は単結晶ダイヤモンドで切削することはほとんど不可能であることから、研削加工が用いられることが多い。そのため超精密工作機械の多くは、別途研削主軸を付加するか、あらかじめ高速で回転することが可能な主軸を具備している。

超硬合金の金型を切削するため、円筒型の焼結ダイヤモンドの先端に多数の切れ刃を研削で作られ、それを用いて超硬合金にマイクロ非球面金型を加工した例を図9、図10に示す⁴⁾。超硬合金やセラミックの金型に対する要求は今後更に増大するものと考えられ、そのための加工技術の一層の開発が求められている。

5. まとめ

切削加工法によって金型を製造する技術とそのための

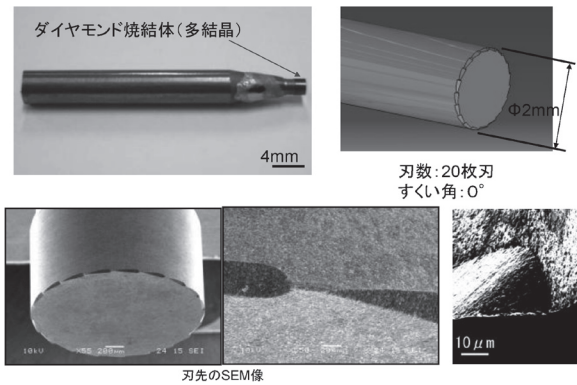


図9 焼結ダイヤモンド製多刃工具

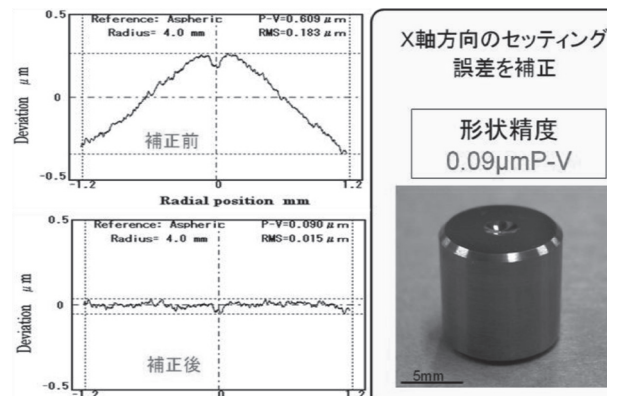


図10 超硬合金製マイクロ非球面金型の加工例

工作機械技術について概観した。今後、金型にはより一層の高精度化、高品質化が求められる、一方では短納期、コストダウンが要求されると思われる。より付加価値の高い金型製造を実現するために、工作機械ならびに関連する工具技術、加工技術およびCAD/CAM技術の一層の高度化が求められている。特に工作機械に関しては、より一層の高能率化、複合化、長時間の安定性が求められるであろう。

参考文献

- 1) T. Moriwaki: Multi-Functional Machine Tool, Annals of the CIRP, 57/2 (2008)pp.736-749.
- 2) M. Sato: Design and Performance of 5-axis Machines in Japan, 第12回国際工作機械技術者会議テキスト(2006)pp.167-189.
- 3) 社本英二, 森本祥之, 森脇俊道:楕円振動切削法(第2報), 精密工学会誌, 65/3(1999)pp.411-417.
- 4) H. Suzuki, T. Moriwaki et al.: Precision Cutting of Aspheric Molds with Micro PCD Milling Tool, Annals of the CIRP, 56/1(2007)