

## 金型磨き作業の知識獲得と自動化に関する研究

### 学位論文内容の要旨

金型の製造工程において、製品部（キャビティ・コア）および、機械部位の形状加工は NC 工作機械、放電加工法等の導入により自動化が進められている。しかし、射出成型用金型の製造工程の30～50%の工数を占める磨き加工は複雑な形状精度と表面粗さの両方を維持することが難しく、いまだに熟練工の手作業に頼っているのが現状である。

本研究は金型磨き熟練工の持つ知識や技能を収集し、この情報を基にした金型磨き方法を教示するエキスパートシステムの構築と、熟練工のもつ技能を再現できる自動磨き装置の試作・開発を行い、その有効性を確認することによって金型製品面の磨き加工の自動化のための基礎的資料を得ることを目的として論じたものであって、7章より構成されている。

第1章は緒論であって、金型の自動磨き装置の試作・開発と磨きに関するエキスパートシステムの構築に関して、これまで行われた研究の概要と問題点について触れるとともに、本研究の必要性と目的及びその研究範囲、ならびに本論文の概要について述べている。

第2章では、金型熟練工の磨き方法に関して、小集団活動の報告書、作業標準、アンケートなどから次のような知識を獲得し、エキスパートシステムに必要な情報について述べている。

1) 金型熟練工は与えられた金型に対して適当な工具と砥粒、番手を選択し、肉眼による表面の仕上がり状態を判断しながら、本人の持っている技能(磨き力、磨き速度、磨き方向の制御等)により鏡面仕上げを行っている。

2) 金型熟練工が磨き手順を決定するためには、前工程の加工法(フライス加工、放電加工等)、最終仕上がり程度(表面粗さ、寸法精度等)、特徴面の性質(自由曲面、離型方向等)を事前の情報として知っておかなければならない。

3) 磨き手順の決定のためは、工具の選定基準と作業手順、さらに現在の工程から次の工程に移るための見極め基準の決定方法が重要である。見極め基準は、前加工面に残る傷の除去する割合を3通りに分類し、それと使用工具の適当な組合せにより、最も短時間で仕上がる磨き手順として決定している。

4) 以上のことから、できるだけ短時間に所望の粗さを得るには、各工具の磨き回数と表面状態の特徴量である表面粗さ、傷深さ、除去深さとの定量的な関係を知る必要がある。

第3章では、熟練工が最も多く使用する複数の工具を用い、工具の種類、砥粒の番手、磨き回数の組合せのもとで熟練工による手作業と往復運動する自動磨き装置により磨き実験を行った。また、3次元動力計を用いて磨き作業の押し付け力と磨き速度を測定し、押し付け力は約20N、工具の速度は約6 m/min 近傍の値が用いられることが分かった。いずれの磨き工具の場合も、前加工面粗さは磨き回数Nとともに指数関数的に改善され、仕上げ面粗さ Ra は前加工面粗さ Ro, 最終仕上げ面粗さ Re, 粗さ定数 a によって決定され、次式で近似することができた。

$$Ra = (Ro - Re) \exp(-a \times N) + Re$$

最終仕上げ面粗さ Re は前加工面粗さの大小によらず使用する工具に依存する。除去深さの特性曲線は2つの直線で近似することができ、その接点（交点）を示す臨界磨き回数  $N_c$  は改善可能な仕上げ面粗さを得る磨き回数に良く一致している。この臨界磨き回数  $N_c$  における除去深さ  $H_c$  は、前加工面粗さ  $R_z$  の  $1/2$  であり、また粗さ定数 a は臨界磨き回数の逆数の2倍である。仕上げ面粗さに関しては手磨き、自動磨きとともに同程度であるが、除去能力は手磨きが2倍程度高く、また傷深さも小さく、しかも磨き工具の種類にかかわらず粗さに対する傷深さの比 ( $H_s/Ra$ ) は4とほぼ一定であることを述べている。

第4章では、ある表面粗さの前加工面が与えられた場合、第2、3章で獲得した熟練工の知識を基にして、非熟練者が磨き工具の選択順序、磨き回数、次の工具の選択の教示を受けられるエキスパートシステムを構築した。このエキスパートシステムには多種多様な磨き工具データと磨き特性データに対処できるように、工具名リスト、工具優先順位、ルールファイルそして第3章の実験で得た数式ファイルで構成されている。また本エキスパートシステムでは金型磨き作業手順決定に関する知識を if - then のルール形式で表現し、前加工面および要求仕上げ面の粗さと傷深さを入力することにより前向きな推論で全可能解を探索することができる。

このエキスパートシステムの解に従って磨き作業を行った結果、工具の選択、磨き回数、表面の粗さの特性は教示された内容と良く一致し、本エキスパートシステムの有効性が検証された。

第5章では、熟練工の磨き特性を再現できる自動磨き装置の試作について述べている。熟練工による磨き作業は、一般にはスティック砥石等を用いた往復運動によって行われている。そこで曲面の自動磨き装置では、セグメント状に加工したスティック砥石を円板の外周に固定して回転砥石を作り、これで磨き実験を行った。回転にはステッピングモータを、押し付け力にはエアシリンダーを用いた。

平面や傾斜面について、多種類の表面粗さの前加工面を用意し、自動磨き装置による磨き実験を行った結果、次のような結論が得られた。回転砥石による自動磨き実験では、磨き面の法線方向へ押し付け力を一定に制御することによって、熟練工の手作業で得たと同様の特性が得られ、表面粗さと磨き回数の関係を表す実験式の適用が可能である。回転砥石による磨きにおいては、回転数  $n$ 、送り速度  $f$ 、磨き回数  $N$  と磨き特性に関係する要因が多いので、磨きパラメータ  $S$  を導入することによって回転数や送り速度に影響されない磨き特性値を得ることが可能になった。磨きパラメータ  $S$  は次式で与えられる。

$$S = N / (f / n) = N \times n / f$$

磨きパラメータを導入することによって、斜面と曲面の磨き実験の結果を統一的に解析出来た。

第6章では、開発した自動金型磨き装置によって、R50mmの二つの円弧によって構成された2次曲面を磨く実験で得られた特性は、平面や斜面の磨き実験と同等の特性であり、熟練工が同じ試料を磨いた実験と比較して、表面粗さ、磨き能率共に両者は同程度であり、自動磨き装置が熟練工の技能に匹敵する性能を持つことを述べている。

第7章は結論と総括であって、本研究において得られた結果を総括して述べている。

## 学位論文審査の要旨

|    |    |      |
|----|----|------|
| 主査 | 教授 | 斎藤勝政 |
| 副査 | 教授 | 池田正幸 |
| 副査 | 教授 | 嘉数侑昇 |
| 副査 | 教授 | 岸浪建史 |
| 副査 | 教授 | 三好隆志 |

(大阪大学・工学研究科)

本論文は金型磨き熟練工の持つ知識と技能を収集し、この情報を基にした金型磨き方法を教示するエキスパートシステムの構築と熟練工のもつ技能を再現できる自動磨き装置の試作・開発を行い、その有効性を確認することによって金型製品面の磨き加工の自動化のための基礎的資料を得ることを目的として論じたものである。

第1章は緒論であって、金型の自動磨き装置の試作・開発と磨きに関するエキスパートシステ

ムの構築に関して、これまで行われた研究の概要と問題点について触れるとともに、本研究の必要性及び目的及びその研究範囲、ならびに本論文の概要について述べている。

第2章では、金型熟練工の磨き方法に関して、小集団活動の報告書、アンケートなどから知識を獲得し、エキスパートシステムに必要な情報について述べている。

すなわち、

1) 金型熟練工が磨き手順を決定するためには、前工程での加工法（フライス加工、放電加工等）、最終仕上がり程度（表面粗さ、寸法精度等）、特徴面の性質（自由曲面、離型方向等）を事前の情報として知っておく必要がある。

2) 磨き手順の決定のためには、工具の選定基準と作業手順、さらに現在の工程から次の工程に移るための見極め基準の決定方法が重要である。

3) 以上のことから、できるだけ短時間で所望の粗さを得るには、各工具の磨き回数と表面状態の特徴量である表面粗さ、傷深さ、除去深さとの定量的な関係を知る必要がある。

第3章では、熟練工が最も多く使用する複数の工具を用い、工具の種類、砥粒の番手、磨き回数の組合せの基で熟練工による手作業と、自動磨き装置による往復運動により磨き実験を行った。いずれの磨き工具の場合も、前加工面粗さは磨き回数 $N$ とともに指数関数的に改善され、仕上げ面粗さ $R_a$ は前加工面粗さ $R_o$ 、最終仕上げ面粗さ $R_e$ 、粗さ定数 $a$ によって決定され、次式で近似することができた。

$$R_a = (R_o - R_e) \exp(-a \times N) + R_e.$$

除去深さの特性曲線は2つの直線で近似することができ、その接点（交点）を示す臨界磨き回数 $N_c$ は改善可能な仕上げ面粗さを得る磨き回数に良く一致している。

第4章では、ある表面粗さの前加工面が与えられた場合、第2、3章で獲得した熟練工の知識を基にして、非熟練者の磨き工具の選択順序、磨き回数、次の工具の選択の教示を受けられるエキスパートシステムを構築した。本エキスパートシステムでは金型磨きの作業手順決定に関する知識をif-thenのルール形式で表現し、前加工面および要求仕上げ面の粗さと傷深さを入力することにより前向き推論で全可能解を探索することができる。本エキスパートシステムの解に従って磨いた結果は教示された内容と一致し、本エキスパートシステムの有効性が検証された。

第5章は熟練工の磨き特性を再現できる自動磨き装置の試作開発研究について論じたものである。曲面の自動磨き装置では、円盤状に加工したスティック砥石で磨き実験を行い、次のような結論を得ている。手磨きの表面粗さと磨き回数の関係を表す実験式の適用が可能であり、回転砥石による磨きにおいては、回転数 $n$ 、送り得度 $f$ 、磨き回転 $N$ と磨き特性に関する磨きパラメー

タSを導入することによって、回転数や送り速度に影響されない磨き特性値を得ることが可能である。

磨きパラメータSは次式で与えられている。

$$S = N / (f / n) = N \times n / f$$

第6章では、開発した自動金型磨き装置によって、2次曲面の磨き実験で得られた特性が、平面や斜面の磨き実験と同等の特性を示し、熟練工が手作業で磨いた仕上げ面と比較して、表面粗さ、加工能率共に両者は同程度であり、自動磨き装置が熟練工の技能を再現する性能を持つことを述べている。

第7章は結論と総括であって、本研究において得られた結果を総括して述べている。

本論文は、熟練工の技能によって行われる金型磨き作業を解析することにより精密工学上有益な多くの知見が得られており、さらにエキスパートシステムの構築により磨き作業の自動化が計られ、生産工学の進歩に寄与するところ大である。

よって著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。