

報告番号	甲 第 11978 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 高硬度金型鋼の高精度楕円振動切削に関する研究
(Study on high-precision elliptical vibration cutting of hardened die steels)

氏 名 齊藤 寛史

論 文 内 容 の 要 旨

我々の生活に欠かせない家電製品や自動車等の部品は、生産性やコストの面から主に金型によって量産されており、金型の精度や製造コストは、量産品の品質および価格に大きな影響を与える。金型の製造工程は、切削加工、研削加工、放電加工によって所定の形状、精度に仕上げるのが一般的で、中でも製品の外観部品に関わる金型や、離型性の向上や焼き付き防止が要求されるプレス金型では、金型表面を鏡面に仕上げる磨き工程が多くなされている。磨き工程は、人の手によって表面を平滑に仕上げる工程であり、作業時間が長く、仕上げ面の品質が作業者の技術に大きく依存する問題がある。また、アジア諸国との競争を背景に、国内の金型産業では付加価値の高い加工技術が求められており、その一例として、成形品の表面に微細な凹凸を転写し、新たな表面機能を付与する技術が注目を集めている。求められる表面機能は様々あり、光の回折を利用して意匠性を高める技術、逆に製品表面での光の反射を防止する技術、液体の濡れ性を制御する技術などが挙げられる。金型による射出成形でこの様な表面機能を発現させることができれば、印刷や塗装、コーティング等の後工程の削減に繋がる。

これらの鏡面加工や微細加工に欠かすことのできない工具が、単結晶ダイヤモンド工具である。ダイヤモンドは最も硬度が高い素材であり、研磨によって数十 nm の輪郭精度を有する切れ刃に仕上げることができる。非球面レンズや回折格子など、形状精度と表面粗さが求められる光学部品の金型は、単結晶ダイヤモンド工具による超精密切削加工が得意とする分野である。しかしこのダイヤモンド工具は、鉄系材料を加工すると熱化学的な親和性により激しい摩耗が生じることも知られており、前述の光学部品の金型は、金型の表

面にダイヤモンドとの化学的親和性の低いニッケルリンめっきを施し、そのめっき被膜をダイヤモンド工具で切削して使用するのが一般的である。しかし、めっきには時間やコストがかかるうえ、金型寿命が短いことや修繕が困難であると言った課題があるため、ニッケルリンめっき金型は光学部品等の一部の製品に使用が限られており、金型製造の現場では磨き仕上げが多くなされているのが現状である。

鉄系材料の高精度加工を実現すべく、ダイヤモンド工具の熱化学的な摩耗抑制に向けた研究はこれまで多くなされている。切削点に二酸化炭素等のガスを供給して摩耗を抑制する手法や、鋼材を窒化処理して、ダイヤモンド工具から炭素原子が拡散するのを抑制する手法など、様々な手法が検討されている。本研究で使用する超音波振動を工具に付与しながら切削する手法は、金型鋼に対し切削距離 1500 m 以上でも鏡面レベルの表面粗さを維持できることが報告されている。初期の振動切削は、主に切削方向に振動させる直線型の振動切削であったが、円または楕円形状で工具を振動させる楕円振動切削は、直線型の振動切削よりも 3 倍程度の工具寿命を実現した。また、直線型の振動切削では切削方向と振動方向の調整が不可欠であったのに対し、円または楕円で振動させることによりこの調整が不要になり、実用性が大幅に向上した。これらの改善により、楕円振動切削は鋼材の鏡面切削技術として金型産業において一部実用化されている。

一方で、この楕円振動切削を更に普及させ、金型産業の競争力向上に寄与するためには、取り組むべき課題が残されている。1 点目は、単結晶ダイヤモンド工具より安価な工具で鋼材の高精度な加工を実現することである。一般のハイスや超硬合金等の切削工具と比較して単結晶ダイヤモンド工具は高価であり、1 桁以上価格が異なると言っても過言ではない。そこで本研究では、単結晶ダイヤモンド工具より安価な 2 種類のコーティング工具を使用し、金型鋼 Stavax の意匠性加工、鏡面加工を検討した。2 点目の課題は、ロックウエル硬度 60 HRC を超える高硬度金型鋼を楕円振動切削したときの工具損耗原因の解明と、磨きレス鏡面加工の実現である。プレス金型等の耐摩耗性が要求される金型では、硬度の高いハイス鋼やダイス鋼が用いられているが、自動車用歯車等の精度向上を目的に、高硬度金型鋼の磨きレス鏡面加工のニーズが高い。高硬度金型鋼には多量の合金成分が添加されており、硬質な炭化物も析出している。単結晶ダイヤモンド工具で楕円振動切削した予備実験の結果では、射出成形用のステンレス鋼等と比較して、工具損耗が早く進行することが示唆された。しかし、摩耗やチッピングが早く進行する原因については、明らかになっていない。

本論文は、これらの課題を解決するために行った以下の研究成果をまとめたものである。第 1 章は序論として、金型の鏡面加工に関する既存の技術、すなわち単結晶ダイヤモンド工具や超砥粒研削砥石による超精密加工について振り返り、鋼材を単結晶ダイヤモンド工具で切削する際に生じる熱化学的な摩耗抑制に関する先行研究を説明した。そして、本研究で使用する超音波楕円振動切削の特徴と課題を整理し、本研究の目的を示した。第 2 章から第 4 章では、工具コスト削減に向けて、2 種類のコーティング工具による金型鋼 Stavax

の楕円振動切削実験を行った。1種類目の工具はダイヤモンドコーティング工具で、超硬合金の母材に多結晶ダイヤモンドを被覆した工具である。従来のダイヤモンド工具より安価に製造できることが期待される。もう1つは、従来から広く利用される窒化チタン(TiN)コーティング工具である。第2章と第3章では、これらのコーティング工具で意匠性の高い虹目加工を実現するため、基礎実験や耐久実験、加工メカニズムの検討を行った。虹面は光の回折現象を利用したもので、 μm オーダーの規則的な凹凸により得られる。2種類のコーティング工具による加工面を比較すると、ダイヤモンドコーティング工具の加工面でのみ光の回折が発現することがわかった。この違いは、楕円振動切削で平削りした際に残るカッターマークの均一性に起因すると考えられ、カッターマークの均一性が高いということは、切れ刃形状が安定して被削材に転写されることを意味する。そこで第2章では、切れ刃形状の転写性を評価する手法を検討した。本来は、切れ刃の断面形状と被削材の断面形状を比較するべきであるが、被削材と接触する切れ刃の場所を特定することは困難であると考えられる。そこで本研究では、被削材の断面形状を相関係数で比較する手法を提案し、2種類のコーティング工具で転写性を比較した。その結果、送り量が $3\ \mu\text{m}$ から $5\ \mu\text{m}$ の場合はダイヤモンドコーティング工具の方がTiNコーティング工具より2.4倍から6倍大きい結果となった。加工面の状態を顕微鏡で観察すると、ダイヤモンドコーティング工具による加工面には、バリが生成されていることがわかった。これは、切れ刃稜線の丸み半径が約 $16\ \mu\text{m}$ と大きいためと考えられる。バリが生成されるものの、その繰り返し性が良好なため、ダイヤモンドコーティング工具の加工面では光の回折が得られたと考えられる。

第3章では、コーティング工具によって転写性や表面粗さが異なる原因について調べるため、切削抵抗を解析し、工具の摩擦係数を算出した。摩擦係数の算出では、送り量を変えながら測定した切削抵抗から、逃げ面で被削材を擦る際に生じるブラウイング成分を解析し、摩擦係数を求めた。その結果、ダイヤモンドコーティング工具は、切削液(ミスト)の有無に関わらず摩擦係数が約0.2と小さいのに対し、TiNコーティング工具では、ミストを供給した場合は摩擦係数が約0.2であるが、ドライ切削の場合は0.77まで上昇した。TiNコーティング工具の加工面はバリが生じないものの、切削方向にスクラッチ痕がみられ、逃げ面と被削材の間で溶着が生じやすいことが示唆された。この現象は、TiNコーティング工具の転写性を悪くする原因にもなったと考えられる。TiNコーティング工具をドライで使用した時の高い摩擦係数は、楕円振動で切りくずを引き上げる作用を強くし、背分力の減少、薄い切りくずの排出等の効果が得られることが示された。しかし、耐久実験の結果では、ミストを使用した場合より逃げ面摩耗が早く、実用的な加工条件ではない。ダイヤモンドコーティング工具の耐久実験では、高い耐摩耗性を有することが示唆された一方で、切削距離 $350\ \text{m}$ または $650\ \text{m}$ で発生したコーティングの剥離抑制が課題である。

第4章では、ダイヤモンドコーティング工具による金型鋼の鏡面切削を検討した。前述のとおり、ダイヤモンドコーティング工具の切れ刃には平均で半径 $16\ \mu\text{m}$ の丸みがあり、

逃げ面の表面粗さも約 Rt 0.75 μm と大きい。したがって、通常のダイヤモンドコーティング工具で鏡面切削の実現は難しく、切れ刃の鋭利化が必要である。本章ではパルスレーザーによる鋭利化方法を適用し、すくい面と逃げ面の両面を平滑に研磨し、稜線の丸みを除去した。本研究で用いた鋭利化方法では、パルスレーザーを 8° の浅い角度で照射し、面に沿って直線に走査することで効率的に平滑な面を創成する。この手法で鋭利化したダイヤモンドコーティング工具で金型鋼 Stavax の楕円振動切削実験を行ったところ、送り量 5 μm のときに表面粗さ Rt 0.07 μm の鏡面が得られた。

第 5 章では、プレス金型等でニーズの高い高硬度金型鋼の鏡面切削に向けた実験を行った。ロックウエル硬度 60 HRC 以上に焼入れした高硬度金型鋼 6 種類を準備し、単結晶ダイヤモンド工具による楕円振動切削実験を行った。また、摩耗と合金成分の関係を調べるため、クロム、モリブデン、タングステン、バナジウムの純金属も被削材として使用した。高硬度金型鋼を楕円振動切削した工具には、切れ刃の先端付近にチッピングが生じ、送り方向の切れ刃に摩耗が生じる傾向が確認された。これらの工具損耗の原因について調べるため、被削材に析出している炭化物の粒径分布、炭化物と基地の硬度差を解析した。また、析出した炭化物の化学結合状態を調べるため、X 線回折による化合物の同定、EPMA 元素マッピングを行った。これらの解析結果と工具損耗を比較した結果、チッピングは、粒径 5 μm 以下の炭化物数の増加と、炭化物と基地の硬度差に伴ない増加する傾向が見られた。また、被削材との熱化学的な作用で進行する摩耗は、基地中のタングステンとバナジウムにより促進される可能性が示された。これらの結果に基づき、単結晶ダイヤモンド工具による楕円振動切削に適した鋼材を示すと共に、60 \times 40 mm のダイス鋼 DC53 に対し、表面粗さ Rt 0.05 μm の鏡面加工を実現した。

最後に第 6 章の結論では、本研究で得られた成果をまとめ、今後の課題について示した。