

氏 名	菅 原 章
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成元年 3 月 15 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 3 9 年 3 月 東北大学教育学部学校教育学科卒業
学 位 論 文 題 目	微小径ドリル加工における微小切削機構に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 渡邊 眞 東北大学教授 鎌田 治 東北大学教授 庄司 克雄

## 論 文 内 容 要 旨

今日、マスメディア産業あるいは製造業から一般家庭にいたるまで、あらゆる分野における情報の高度化展開が急速に進んでいる。

このような進歩の大部分は、各種の工場現場の技術革新によるところが大きく、その製品の大きさは、資源の有効利用の点からここ数年来、小型化するなかで軽薄短小化が時流になっている。

製品の軽薄短小化を促進させるものの一つに穴径の微小化があげられ、また現在使用されている微小穴の高精度および高信頼度化が要求されている。これらの技術の確立によって他方面での利用が、例えば工業的な立場からはプリント基板の穴径の微小化による製品の小型化、また物理実験的立場からは光学系スリットあるいは光学絞りとしての物性研究における利用などがある。

微小な穴の加工方法としては、従来から用いられている微小径ドリルあるいはポンチを用いた打ち抜きによる機械的加工に加えて、高密度エネルギー加工としての放電加工、レーザ加工、電子ビーム加工、などの特殊加工がある。

これらの加工法のなかで微小径ドリルを用いる機械加工は、特殊な設備を必要としないし、被削材の材質、形状あるいは使用目的によっては精度的にも優れており、広く用いられている。しかし、その加工法の多くは技能者の熟練度に依存している点が多く、微小径ドリル加工における微小切削機構の解明を図るとともに、その切削機構にもとづいた加工技術の体系化が必要である。

しかしながら、ドリル加工においてはドリルそのものの構造が非常に多くの構成要素に支配されており、一様な加工条件の下で機械的性質が異なる種々の金属について実験し、その結果から微小切削機構全般を説明し得る一般的な法則を見つけ出すことは極めて困難である。

したがって本研究では、下記に述べる考え方をもとに実験を進めて微小切削機構を解明し、その工業的な応用を図っている。

すなわち、ドリル加工においてはドリル直径、回転数、送り、切削油剤、などの加工条件およびドリルの刃先を構成する諸要素と、被削材組織の結晶粒の大小および塑性挙動、などの要因を区別して前者を加工要因、後者を材料要因としてこの二つの要因から微小切削機構を考察している。

実験方法としては、従来推奨されている一般的な加工条件の下で穴あけ実験を行い、これによって得られた一般的な現象を有効穿孔率（以下の文においては穿孔率と略す）と言う考え方を提唱しこれを用いて、直径あるいは被削材の異なる加工状態の違いを定量的に比較している。この結果、微小径ドリル加工における切削は、工具材質中の炭化物が切れ刃稜上に点在し、これらが個々の切れ刃になり微小切削が行われることを明らかにしている。

これらの結果にもとづいて、微小径ドリル加工における切り残しが少なく高精度な穴あけについて考察し、それに必要な機器の開発を行っている。

本論文の構成は以下の通りである。

## 第 1 章 序 論

第 1 章は序論で、微小径ドリル加工における本研究の位置づけ・目的とその重要性について論じている。穴加工は産業界の切削加工分野においておよそ30%を分担する重要な技術とされている。それにもかかわらず、ドリルによる微小穴加工についてはこれまで体系的に研究された例はなく、技能者の熟練度に依存する部分が多い加工法である。微小径ドリル加工が先端産業において果たしているその重要性を考え、今後も研究開発を必要とする課題が少なくない点を明確にしている。

## 第 2 章 有効穿孔率におよぼすドリル刃先形状の影響

被削材試料あるいはドリル直径の違いによる穴加工状態を比較する方法として穿孔率の考え方を提唱しその定義について述べ、これを用いることによって穴の加工状態の比較が非常に有効に行われることを実験的に確かめている。

穴の加工状態は加工要因に大きく影響を受け、その結果として上側穴周辺に生成される『もりあがり』および抜け側穴周辺に生成される『かえり』といわれる切り残し量を定量的に測定することによって、穴の加工状態の違いを判断する基準になると考えている。

まず最初に切り残しの生成過程を明らかにし、次に先端角あるいは逃げ角の違いが穿孔率にどのように影響するかを究明し、さらに刃先形状の良否が加工におよぼす影響を検討した結果、加工状態の違いを比較する方法として穿孔率の有用性を確認している。

一般に市販されている微小径ドリルの刃先形状は理想的な形状からはずれ悪くなっており、刃先形状の悪さは直径が小さいほど切り残しの生成を大きくすること、切り残の生成を少なくするためには、1回転当たりの切込み深さを小さくすべきであるということを、穿孔率を用いて比較することによって明らかにしている。

### 第3章 ドリル直径の微小化に伴う加工要因の影響

直径が大きいドリルから小さいドリルまでの一連の穴あけ実験を行い、加工状態を穿孔率で比較し検討している。その結果、微小径ドリルは切れ刃が鋭利でないにもかかわらず切り残しが少なくなる傾向にあることを見いだしている。

次にこの傾向が加工条件の違いに起因する現象なのか、あるいは同種被削材であっても試料の作製状態の違いに起因する現象であるか否かについて究明し、その結果、この現象は微小送りによる微小径ドリル加工特有の傾向であると考え、新たに微小切削機構を提唱し、これによって微小径ドリル加工で穿孔率が良くなる現象を解明している。

微小送りでは、丸味半径を持つ切れ刃稜のために上すべりを生じて切削ができないと言われている。しかし微小切込みの場合に、工具材質中の炭化物が切れ刃稜上の微小な個々の凸部となり、それらがそれぞれ切れ刃になり得るとすれば切削は可能と考えられ、これを微小切削効果としている。

実際の微小径ドリル加工においては、切れ刃の鋭利さによる刃先形状効果は小さいが、微小切削効果が穿孔率を良くし、これらの効果の相乗作用によって穿孔率が高くなり、実験結果と良く一致することを明らかにしている。

### 第4章 微小切削におよぼす加工要因の影響

第4章では、第3章の微小切削機構の考え方を検証するための実験を行っている。

まず、切れ刃を持たないモデル工具を用いた加工において、微小送りで穴あけが可能であり、また送りを小さくすると切削抵抗が小さくなることを明らかにし、このことを微小径ドリル加工においても確かめている。

さらに、加工を中断あるいは数個の穴加工後のドリル刃先形状を観察することによって切れ刃稜上の個々の微小な凸部（工具である高速度鋼中の炭化物）がそれぞれ切れ刃になって上すべりを起こさず微小切削が行われることを確認している。また、曲率半径を持つ実際の切れ刃稜は、加工の進行とともに被削材と最初に接触したその位置と形状を変えながらすくい面上方へ移動することを明らかにしている。

上記のように、切れ刃稜がその位置と形状を変えながら上すべりを起こさず微小切削が行われるのは、ドリルおよび被削材が加工応力によってそれぞれたわみ、加工応力の増大によって被削材に食い込む過程を繰り返しながら加工が進行するためであることを明確にしている。

### 第5章 ドリル直径の微小化に伴う材料要因の影響

組織が異なる数種類の試料に直径が異なるドリルによって穴あけし、その加工状態を穿孔率を用いて比較している。その結果、ドリル直径の微小化に伴う穿孔率の傾向は、被削材組織の違いにより次の3つの傾向に大別できることを明らかにしている。

1. 単結晶体のときにはあまり変化がない。
2. 多結晶体で比較的結晶粒が大きい試料については、次第に小さくなり、あるドリル直径で最小になるがさらに小径化するにしたがい高くなる傾向にある。

3. 多結晶体で結晶粒が小さい試料のときには、次第に小さくなる。

## 第6章 微小切削におよぼす材料要因の影響

第6章では、微小径ドリル加工ではドリル直径と結晶粒の大きさとの関係で被加工面に含まれる結晶粒の数や大きさ、結晶粒界、などの微視的組織が加工に影響することを明らかにしている。

まず最初に、加工によるすべりに対応して層状変形の痕跡を示すすじ痕（すべり線）の観察によって、塑性変形し易い面積は結晶粒界が被加工面から離れている場合および被加工面内の結晶粒数が少ない場合に大きくなることを明らかにしている。

次に切削抵抗は、同じ直径のドリル加工でも被加工面内の結晶粒数が多い場合に大きくなることを確認している。

以上の結果をもとに、モデルを用いた計算によって各径ドリルの穴加工における中心位置が結晶粒との関係で、塑性変形領域におよぼす影響を明確にしている。

## 第7章 微小径ドリル加工における切り残しの少ない加工法

本章では、まず最初に、前章までに明らかになった微小切削機構をもとに、市販の微小径ドリルを用いた穴あけ加工において切り残しが少なくなるための加工条件として、微小送り速度を提唱している。

さらに、加工精度を高める機器の開発について述べている。その第一は、刃先部の曲がり矯正する心出し装置であり、次は切れ刃を鋭利にする微小径ドリル研磨機である。開発したこれらの機器を用いた穴あけでは、加工条件の設定が容易であること、切り残しが少なく、穴の拡大しろが小さくなり、ドリル寿命が伸びることを明らかにしている。また、送り速度を調節することによってスラストを制御できる微小径ドリル用ボール盤を開発し、これによって加工時間の短縮、精度の向上を確認している。

## 第8章 結 論

第8章は結論で、本研究の結果の要約と、研究結果の工学的および工業的意義について述べている。

本研究は、これまで技能者の熟練度に依存し、また加工技術の体系化が遅れている微小径ドリル加工の分野において、微小切削機構を解明し、これにもとづいて加工能率と精度の向上を目的とする機器開発を行っている。この研究によって、微小径ドリル加工技術の体系化の礎を築くことができたと信ずる。

今後ドリル自体の形状精度の問題、各種被削材ごとの最適加工条件の設定など解決すべき問題も残されており、これらの諸問題に対する研究が積極的に行われ、微小径ドリル加工技術の開発が加速されれば幸いである。

## 審査結果の要旨

最近の電子製品やコンピュータ周辺機器に見られるように、部品の高機能化、高密度化が益々進む中で、機械加工の約20%を占めるといわれる穴明け加工についても、高精度化、高能率化と共に微小化が大きな課題となっている。本論文は、微小径ドリル加工における切削機構の解明と精度向上を目的にした一連の研究をまとめたもので、全編8章より成る。

第1章は緒論で、本研究の目的および意義について述べている。

第2章では、有効穿孔率の概念を導入することによって、ドリル加工における切削性能を定量的に評価することを提案している。そして、先端角および逃げ角など工具作用角と有効穿孔率との間の関係を求め、ドリル設計のための指針を与えると共に、有効穿孔率の有用性を確認している。

第3章では、 $50\mu\text{m}$ ～ $2\text{mm}$ にわたる各種径のドリルについて有効穿孔率を比較し、極微小の領域では逆に有効穿孔率が向上することを明らかにしている。そしてSEMによる切れ刃稜の詳細な観察から、極微小の領域では工具材質中の炭化物粒子によるいわゆる微小切削効果によって材料の除去が進行するという考え方を提案している。

第4章では、切れ刃稜を持たないモデル工具を用いて、微小切込みであれば切削が可能であることを示している。また、極微小径ドリルの切れ刃稜を追跡観察し、加工時間の経過に伴って切削点が移動することを究明して、前節の仮説の妥当性を確かめている。

第5章では、有効穿孔率に対する被削材の結晶粒径の影響について検討し、結晶粒径に対しドリル径が相対的に小さくなるほどドリルの切削性能が向上することなどを明らかにしている。

第6章では、被削材表面の微視的組織の塑性挙動を観察し、被削面と幾何学的に干渉する結晶粒の断面積が小さいほど有効穿孔率が高くなることを、迂り線の動き易さと関連づけて明らかにしている。さらにこの面積が、結晶粒径とドリル径の比に依存することをシミュレーションによって明らかにし、本論文の1つの課題である有効穿孔率のドリル径依存性を巧みに説明している。

第7章では、最適作用角が被削材によって異なることから、簡易型の微小径ドリル研磨機の必要性を提唱し、試作している。また本研究の結果に基づいて、微小送りの可能な微小径ドリル用高能率ボール盤を開発している。これらはいずれも、工業界にとって有用な成果である。

第8章は、本論文の結論である。

以上要するに本論文は、微小径ドリルの切削機構を解明し、加工精度の向上を図る上で重要な指針を与えると共に、高能率加工機を開発するなど、精密工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。