

We conduct many of these

We conduct many of these

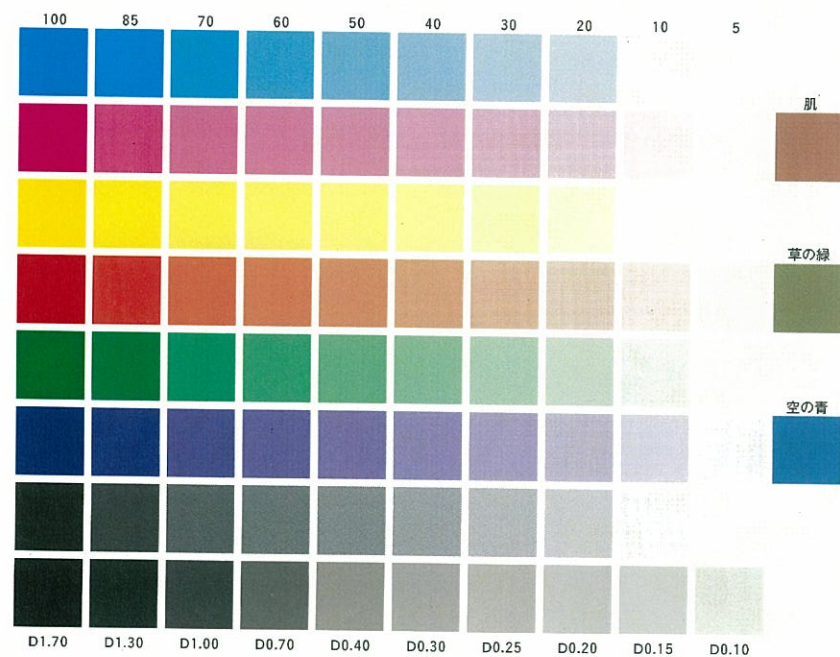
We conduct many of these



We conduct many of these

We conduct many of these

We conduct many of these



## 超硬小径ボールエンドミルによる 深彫り加工に関する研究

2006 年 9 月

赤 松 猛 史

## 目 次

第 1 章 緒論	1
第 2 章 小径エンドミルの切削特性	6
2-1 緒言	6
2-2 エンドミルの切削機構	6
2-3 エンドミルに作用する力	7
2-4 エンドミルの切削性能に関わる因子	9
2-5 工具材料の影響	10
2-5-1 工具摩耗の影響	10
2-5-2 工具のたわみの影響	14
2-6 工具形状の影響	15
2-7 切削実験	16
2-7-1 実験方法	17
2-7-2 実験結果および考察	18
2-8 結言	20
第 3 章 小径エンドミルの折損対策とその評価	21
3-1 緒言	21
3-2 実験内容	22
3-2-1 実験用試料	22
3-2-2 実験装置およびその方法	24
3-3 実験結果および考察	24
3-4 結言	29
第 4 章 工具突出し量が加工精度に及ぼす影響	31
4-1 緒言	31
4-2 実験内容	32
4-3 実験装置および工具	33
4-4 実験条件および方法	35
4-5 実験結果および考察	38
4-5-1 工具突出し量が形状精度におよぼす影響	38
4-5-2 工具突出し量がびびり振動に及ぼす影響	40
4-6 結言	44
第 5 章 切削加工条件が加工精度に及ぼす影響	45

5-1 緒論	45
5-2 切削加工条件	45
5-2-1 切削速度	46
5-2-2 切取厚さ	46
5-2-3 切込みと送り速度	47
5-3 実験内容	48
5-3-1 切削速度の影響	49
5-3-2 一刃送りと切削速度の影響	50
5-4 実験結果および考察	51
5-4-1 切削速度が切削特性に及ぼす影響	51
5-4-2 一刃送りと切削速度の関連性	53
5-5 結言	55
第6章 工具たわみの要因とその評価	57
6-1 緒言	57
6-2 実験内容	57
6-2-1 実験装置および実験方法	58
6-2-2 工具母材材質	64
6-2-3 コーティング薄膜材質	65
6-2-4 エンドミルの首形状	67
6-3 実験結果および考察	69
6-3-1 工具母材材質が工具たわみ量に及ぼす影響	69
6-3-2 コーティング薄膜材質が工具たわみ量に及ぼす影響	75
6-3-3 コーティング薄膜材質の残留応力と工具たわみ量の関係	82
6-3-4 エンドミルの首形状が工具たわみ量に及ぼす影響	86
6-4 結言	89
第7章 工具のびびり振動対策と最適化	91
7-1 緒言	91
7-2 びびり振動が発生する要因	91
7-2-1 実験方法	91
7-2-2 実験結果および考察	94
7-3 深彫り加工における高精度化	99
7-3-1 工具補正必要量の算出	100
7-3-2 工具たわみ量と工具摩滅量を考慮した新補正方法	101
7-3-3 実験結果および考察	105
7-4 結言	110

第8章 結論	111
謝辞	115
学術論文および講演発表	116

## 第1章 緒論

近年の家電製品や機械製品の小型精密化には目を見張るものがある。また、電子関係や半導体関連の部品も精密でかつ複雑なものが増えてきている。

それは、同時にその原形となる金型の高精度化が実現されたことによるものである。一方、その金型の加工形状も複雑化が進み、その形状によっては最適な加工方法を選択する必要性に迫られており、金型を加工する上で最も代表的な加工方法として切削加工がある<sup>1)</sup>。

切削加工の基本的な課題としては、良質のもの（高精度、高品質な製品）を、速く（高能率に）、安く（低コストで）生産することである。つまり、切削加工の高精度、高能率、低コスト化を実現することに他ならない<sup>2)</sup>。最近では、多様化する製品の要求に答えるために切削工具の開発は急速に進んできている。

その切削加工の中でも、特に大きな役割を果たしているものとしてエンドミル加工がある。エンドミルは、マシニングセンタやフライス盤による切削加工の中心的工具であり、金型をはじめとする金属製品の加工には必要不可欠な存在となっており、現在では様々な形状および材質のエンドミルが開発され、非常に幅広い分野において利用されている。さらに、コーティング技術の発達に伴い、従来では不可能であった高硬度材の直彫り切削加工が可能になりつつある<sup>3)</sup>。

一方、今日の主要な工業製品である航空機、自動車、家電製品などで使われる構成部品の製作は、その大部分が鋳造やダイカスト、鍛造、射出成形などの方法によって行われている。これらの方法は、同一形状の製品を多量に生産するためのものであり、精密な金型を用いて行われている。また、金型の需要分野は家庭用機器、事務用機器、光学機器、運輸用機器、産業機器、電気機器、ガラス容器、建築用機材、玩具、雑貨などの製品の広い範囲にわたり、多量生産部品の生産手段として大きな役割を産業界で果たしている<sup>4)</sup>。

金型の加工は、旋削、穴あけ、フライス加工といった切削加工の他に研削加工、研磨加工、放電加工などを加えた加工技術の集約によってなされており、これらを顧客のニーズや要求精度に合わせて選択、組み合わせて加工する。そのような中で、切削加工は高精度、



高能率、低コスト化の要求を満たす加工方法として広く用いられている<sup>9)</sup>。特に、光学機器部品や電子部品などのハイテク部品に対しては高精度加工が求められている。金型品質の成形加工に対する影響度は70～80%といわれ、質の高い成形、すなわち成形品の品質と生産性は金型の品質に依存すると言っても過言ではない。

今日、日本で製作されている金型の年間総生産高は図1-1に示すように1兆3千億円強に達しており、その約40%がプラスチック成型用金型で占められている<sup>9)</sup>。プラスチック成形は、成形材料であるプラスチックに熱と圧力を加え溶融流動あるいは軟化させ、金型を用いて必要とする形状に賦形し、金型と熱交換し、溶融プラスチックを成形品にする製造技術である。

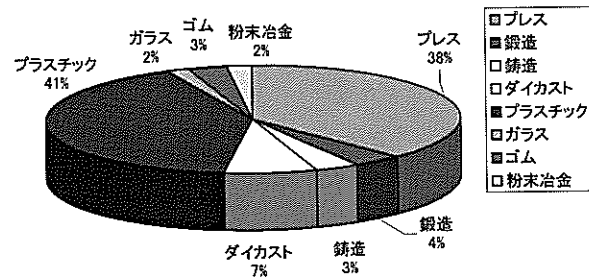


図1-1 金型の生産品目別生産量<sup>6)</sup>

ここで、金型の品質を考えると、金型材料の選定が重要であるが、一般に射出成形用の金型用材料あるいは金型用鋼として対象になるのは、彫込み部に適用される材料である。金型品質を考えると、金型製作では、まず成形する樹脂による摩耗や腐食、ショット数などからどのような金型材料を選定するか、そして熱処理もしくは表面処理を施すか否かによって、金型品質にかなりの差異が生じてくる<sup>7)</sup>。金型材料の選定における品質のポイントを摩耗、腐食、鏡面、シボ面のいずれにおくか、それと熱処理を施す金型については、その行程を熱処理してから仕上げるか、仕上げてから熱処理をするかで選定する材料を変えなければいけない<sup>8)</sup>。最近では、金型の寿命を向上させるために材料の硬度も硬くなる傾向にあり、それに伴って加工が困難になる傾向にある。しかし、近年の工作機械の進歩とエンドミルの切削性能が大幅に向上したことから、一般的な金型加工は切削加工で十分に補えるようになってきた<sup>9)</sup>。

しかしながら、金型等の加工の中で深い加工や隅部の加工というのは、特に不安定な切

削になるため高精度で加工を行うことは非常に困難であり、現実にはまだまだ放電加工を用いていることが多い。特に最近では、金型も微細で複雑なものが増えており、必然的にエンドミルの工具径も小径のものを使う必要がある。そのため、このような加工において切削加工を適用することは皆無に近い状態である。

特に、このような小径エンドミルを用いて、深彫りの切削加工を行う場合に問題となるのは、

1. エンドミルがたわみ、理論寸法どおりに仕上がらない。
2. 切削中のびびり振動によって工具が欠損し、仕上げ面精度も悪くなる。
3. 工具摩耗によって、切削抵抗が大きくなり、たわみ量が増大する。

などである。

エンドミルは、非常に高精度、高能率な切削工具であるが、エンドミルの全長が長くなり、突き出し量が増大すると、剛性が低くなり、びびり振動の誘発などによって切削状態が不安定になり、加工精度が低下してエンドミルのもつ本来の工具としての利点が損なわれることになる<sup>10)</sup>。特に、金型材料の高硬度化が進んだことで、工具のたわみがより一層増大し、工具摩耗も大きくなることから切削加工によって行うことは極めて困難である。一方、放電加工では切削抵抗などの影響を受けることなく加工ができるために金型の深彫り加工に広く採用されている。しかしながら、放電加工は工程数が多くなり、加工能率も低いという欠点を有しており、また加工変質層を生じやすく、火災の危険性を伴うこともあり、現在の高能率化へのニーズを満足するには至っていないのが現状である。

そこで本研究では、小径エンドミルを用いた深彫り加工に着目し、その可能性を探ることを目的とするものである。エンドミルによる切削加工は、放電加工とは異なって加工工程が非常に少なく、顧客のニーズに応えるためには大変重要な加工方法である。しかしながら、上述のように深彫り加工になると加工精度の低下は否めないことから、その加工精度低下の要因をまず追求することが必要となる。

以上述べたように、小径エンドミルを用いた深彫り加工には数多くの問題点が残されており、生産レベルにおける切削加工技術は一般的な切削加工に比べて確立されていないのが現状である。

本論文の研究対象およびそれに関する提案事項は、これらの課題に対して深彫り加工の高精度加工の実現に向け、あらゆる角度から工具形状の最適化を提案し、その工具形状の開発を実験的および理論的な両面より解析することによって、高硬度材の深彫り加工法の確立を試みるものである。

本論文の構成を以下に示す。

まず第2章においては、小径エンドミルを用いた深彫り切削の問題点を明らかにするために、エンドミルの切削性能に及ぼす影響因子や現状の概略を述べるとともに問題点の指摘を行っている。

第3章においては、小径エンドミルの折損メカニズムを明確にし、エンドミルの首形状による静剛性の影響について実験的な検討を行っている。

第4章においては、工具突出し量が加工精度に及ぼす影響について検討を行っている。加工材料としては、高硬度材であるSTAVAX（SUS420J2相当材）を用いて切削抵抗波形が工具突出し量によってどのように変化するかについて考察を行っている。

第5章においては、切削条件が切削性能に及ぼす影響について、特に切削速度および一刃送り量の観点から検討を行っている。

第6章においては、工具母材材質、コーティング材質および工具首形状を変化させたときの切削特性を吟味し、それぞれの性能因子の最適な方向性の検討を行っている。

第7章においては、工具のびびり振動が発生する要因を明確にし、工具形状の観点からその対処方法について検討を行っている。さらに、加工プログラムの補正方法について最適な方法を模索し、深彫り切削加工の高精度化を追求している。

第8章で、各章の研究成果を要約し、総括している。

## 参考文献

- 1)武藤一夫：金型設計・加工技術 日刊工業新聞社 1995
- 2)松岡甫篁：機械と工具, Vol.46No.9, (2002)10.
- 3)石川剛史：機械と工具, Vol.45No.12, (2001)67.
- 4)三谷景造：実践金型設計 工業調査会 1999
- 5)山田眞次郎,神雅彦：精密工学会誌, 第69巻第7号, (2003)939.
- 6)機械統計月報：型技術, Vol.19No.12, (2004)5.
- 7)青葉 堯：射出成形・金型マニュアル 工業調査会 1989
- 8)山本誠次：ツールエンジニア, Vol.43No.10, (2002)52.
- 9)高橋一郎,安斎正博：精密工学会誌, 第65巻第6号, (1999)867.
- 10)北嶋弘一,重田浩司：2002年精密工学会春季大会講演論文集, (2002)541.

## 第2章 小径エンドミルの切削特性

### 2-1 緒言

切削加工における小径エンドミルの重要性は年々高くなってきており、国内の生産現場では新たな対応が求められている。高精度・小物部品の高効率な加工方式の追求と確立は、国内におけるものづくりの新たな展開の有効な手段として認識されている。金型の直彫り加工に代表されるような複雑かつ高精度な3次元形状創成のためのボールエンドミル加工は、これまで非効率な面もあったが、近年の切削工具の開発および工作機械をはじめCAD/CAMや周辺技術の進歩によって急速に高速切削化が図られている<sup>2)</sup>。しかしながら、金型の深細部などの加工においてエンドミルの突出し量を長くして加工する必要があり、高精度・高効率切削を行うには非常に困難な問題を伴う<sup>3)</sup>。

本章では、エンドミルの基本的な切削特性について述べ、エンドミルの切削性能を左右する影響因子について述べ、それらの因子が小径エンドミルの深彫り切削加工に対してどのような役割と問題点があるか指摘を行う。

### 2-2 エンドミルの切削機構<sup>4)</sup>

エンドミルとは、端(end)にも切れ刃(mill)を有する工具という意味で、JISでは「外周面および端面に切れ刃を持ったシャンクタイプフライスの総称」とある。すなわち、外周と端面両方に切れ刃を持っていることから、一本の工具で正面削り、段削り、輪郭削り、溝削りおよび曲面削りからポケット加工まで多種多様な用途に対して切削可能な転削工具の一種である。

エンドミルは、もちろん穴あけ加工も可能であるが、その使用方法としてはほとんどが軸直角方向に送られるため、切削トルクやスラストなどの軸対称な切削力の他に軸に対する極端な曲げ応力を受ける。そのため、ドリル、リーマ、タップ等のシャンクタイプの同様の切削工具に比べて切削抵抗の作用方向や切削機構が著しく異なり、それらを予測することは困難である。さらに、エンドミルの送り方向に対して直角方向に作用する切削抵抗は、切削加工面に複雑なうねり面や傾斜面を生成させる要因となり、加工面精度に対して

は大きな問題となる。つまり、エンドミル加工における切削特性を把握するためには、切削抵抗の大きさや作用方向などに対する挙動を十分に捉えることが極めて重要なことと言える。

### 2-3 エンドミルに作用する力

前述のとおり、エンドミルは切削トルクとともに強力な曲げ応力を受けるが、その方向は必ずしも送り方向ではなく、送りに直角方向に左右への曲げ応力を受けることになる。この曲げモーメントは、繰り返し曲げ応力として刃溝の切り上がり部や首下の根元部に集中して作用する。このように、刃溝の切り上がり部や首下の根元部には、エンドミルが一回転している間に両振り(引張りと圧縮)の応力を受け、これが繰り返しかかるため、静的曲げ破壊モーメントよりはるかに小さいモーメントによって疲労破壊を生じることになる。したがって、エンドミル本体にはこれらの疲労が蓄積されていくため、次第に疲労破壊寿命に至るものと考えられる。

エンドミルに作用する力、すなわち切削抵抗には図2-1に示すような力があり、それぞれが切削中に変化しながら作用している。それぞれの特徴については、以下に示す。

#### (1) 切削トルク $T$

切削トルク  $T$  は、エンドミルの回転方向と逆向きに作用して、エンドミルをねじる方向に作用する。この切削トルクが直接の原因でエンドミルの折損が生じることはないが、後述する垂直方向分力  $F_z$  とともに作用してコレットチャックからエンドミルを引き抜く方向に作用する力として無視することができない。

#### (2) 送り方向分力 $F_x$

エンドミルに作用する送り方向分力  $F_x$  は、上向き切削(アップカット)の場合には、送り方向と同一方向に、下向き切削(ダウンカット)の場合には、送り方向と逆向きの方向に作用する。

#### (3) 半径方向分力 $F_y$

半径方向分力  $F_y$  は、送り方向分力と直交する方向、すなわち加工面に垂直な方向に作用する。したがって、加工面に生じる粗さ、うねり、傾きなどの加工精度を支配する重要な因子である。

#### (4) 垂直方向分力 $F_z$

右刃、右ねじれ角をもつ一般的なエンドミルでは、コレットチャックからエンドミルを引き抜く方向に垂直方向分力  $F_z$  が作用する。被削材側から見れば、被削材が上へ引き上げられようとする方向に作用する力である。この被削材を引き上げようとする力により、被削材が浮き上がるために設定切り込みよりオーバカットしたり、小径フライス盤などにおいてはテーブル自体が浮き上がることもある。これらの影響は、ねじれ角が強くなるほど大きくなる。

#### (5) 曲げ抵抗 $R$

エンドミルの折損原因である曲げ抵抗  $R$  は、送り方向分力と半径方向分力の合力であり、以下の式で算出できる。

$$R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (2.1)$$

この曲げ抵抗  $R$  は、エンドミルの一回転を一周期として、刃溝の切り上がり部や首下の根元部分に両振りの繰り返し応力として作用し、エンドミルの疲労破壊の直接的な原因となる。

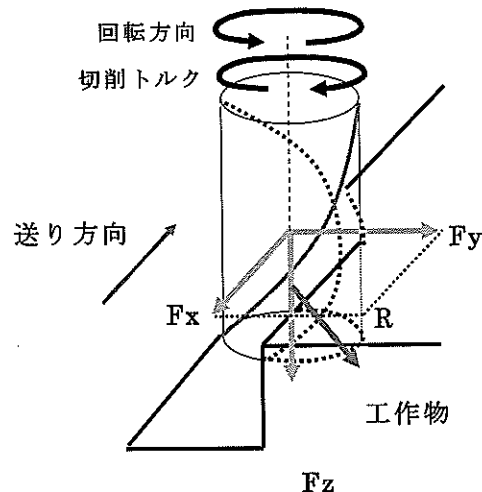


図 2-1 エンドミルに作用する力

#### 2-4 エンドミルの切削性能に関わる因子

エンドミルの切削性能を考えた場合、その因子としてさまざまなものが考えられるが、大きく分けると次の3つが挙げられる。

- (1) 工具材料
- (2) 表面処理技術（コーティング技術）
- (3) 工具形状

また切削性能として最も重要視されるものの一つとして、エンドミルの工具損傷が挙げられる。すなわち工具摩耗の状態によって切削性能は大きく変化することになる。ここで、工具摩耗の形態としては以下に示す4つの形態に分類できる。

##### (a) 機械的摩耗：

工作物中の硬い粒子がすくい面に引っかいて削り取る。低速切削では工具摩耗の主原因となる。

##### (b) 溶着摩耗：

高温状態下において切り屑がすくい面に溶着し、工具の一部が切り屑に持ち去られる。これが大規模に起こるとチッピングになる。

##### (c) 拡散摩耗：

切削温度の上昇にともなって工具材質の一部と切り屑材質との間の相互拡散により、工具内にできた中間の化合物層の強度が低いため、工具の摩耗が進行する。

##### (d) 化学的摩耗：

工具材料が他の物質と反応して化合物を作り、それが切り屑によって取り去られる。

上記のそれぞれの因子に作用する現象の関係は、図 2-2 に示すように表される。工具材料は、エンドミルの耐摩耗性に最も影響を及ぼしており、最近では高能率切削に対応するために超硬合金が主流となっている。当然のことながら工具材料はたわみに大きく関係し、切削中に発生するそのたわみによって切削状態は極めて不安定となり、仕上げ面精度を悪化させることになる。さらに、切削条件や工具形状の違いによって切削抵抗が増減し、2次的な要因で工具のたわみ量が増減する。また工具そのものの耐摩耗性が悪ければ切削抵抗が増大するため、たわみはさらに悪化し、仕上げ面精度も悪くなる。また、工具形状によって切削抵抗の増減や仕上げ面精度の優劣が変化するため、それぞれの切削現象は常に

関係を成していることになる。

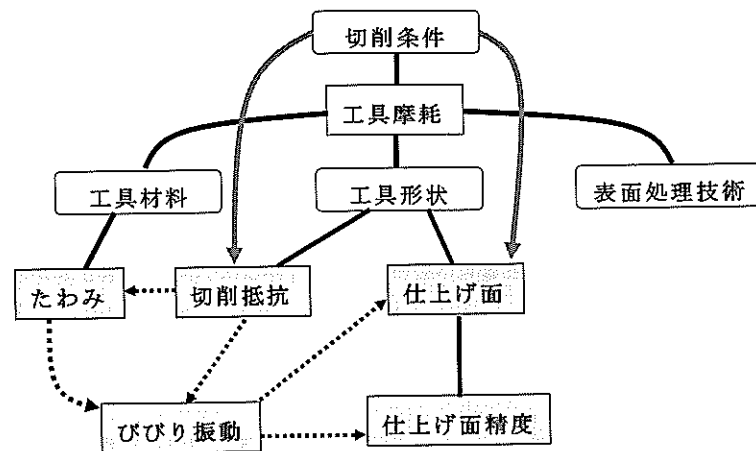


図 2-2 それぞれの因子が作用する相関図

このような工具材料、工具形状、表面処理技術の最適化を図ることで、現在の高精度・高能率切削が実現できていることは言うまでもない。しかし、小径エンドミルを用いて深彫り切削を行う場合には、それぞれの因子の影響が大きく、複雑に作用するためにそれらの現象を把握することは困難である。以下にそれぞれの因子の影響や問題点について述べる。

## 2-5 工具材料の影響

近年、切削工具、特にエンドミルの素材は超硬合金が主流となってきた。これは、時代の背景として、マシニングの高速化、被削材の高硬度化に伴い、切削のスタイルそのものが大きく変化してきていることによるものである。ただし、超硬合金と一言でいってもその種類は様々であり、用途に応じて組成の最適化がなされている。

ここで、小径エンドミルによる深彫り切削を行う場合、工具材料の因子が与える影響として工具摩耗および工具のたわみが考えられる。

### 2-5-1 工具摩耗の影響<sup>6)</sup>

エンドミルを用いて切削加工を行う際には、工具損傷が必ず発生するが、この工具損傷

状態が悪ければ金型を高精度に仕上げることはできなくなる。工具損傷の発生する過程から考えると、切削作用は工具材料と被削材との高温高圧下における激しい摩擦現象に他ならない。

切削温度は、切削条件によって1200～1300℃以上にも到達する。また、切削抵抗においても主分力は切削断面積1mm<sup>2</sup>あたり500～700kgを超えることもまれではない。摩擦速度は、工具逃げ面では切削速度に等しい。高温に加熱された切り屑が擦過する工具すくい面においても、切り屑圧縮比などから推定すると、切削速度の1/2～1/3の摩擦速度が与えられているものと考えられる。

連続切削のように、切削の開始から終了まで切れ刃が被削材に食い込んだままで連続的に切り屑を排出する安定した切削において、切削工具の切れ刃はこすり摩擦や熱的応答、塑性変形などの工具損傷を生じる条件下に置かれている。しかしながら、正面フライス加工をはじめとする断続加工になると、切れ刃が受ける切削状態の過酷さは一段と増し、切れ刃は断続的に被削材に食い込む際に発生する大きな機械的衝撃、切削と空転を交互に繰り返すことによる熱的衝撃によって、摩耗や塑性変形、チッピングや熱亀裂などが生じやすい状態に置かれている。すなわち、切削工具材料には次のような特性が望まれる。

- (1) 常温・高温硬度が大きい。
- (2) 靱性、耐機械的衝撃性が高い。
- (3) 耐熱衝撃性・耐熱疲労性が優れている。
- (4) 耐酸化性・耐拡散性など、高温化学安定性が高い。
- (5) 耐溶着性が高い。

高速切削を行う場合、切削工具側の現象としては切れ刃の軟化、塑性変形、拡散摩耗などが起こりやすくなる。したがって、これらの現象を抑制させるとともに耐折損性、耐熱亀裂性に優れることが求められる。表 3-1 に超硬素材の特徴と用途を示す。最近の傾向としては超微粒子化が進んでおり、切削環境の変化に伴って、その傾向はますます強くなってきている。

表 3-1 超硬素材の特徴と用途

小分類	特 徴	用 途
P 種	WC の他に、高融点炭化物 TiC, TaC, NbC などを加えて耐熱性を増大。	鋼、鋳鋼切削用。
K 種	WC-Co 系、耐アブレッシブ摩耗性、ヒートクラック性が大きい。	鋳鉄、非鉄金属、非金属切削用。
M 種	P 種、K 種の間中材質。各種性質も中間的性質を示す。	汎用性がある。鋼、鋳鉄、ステンレス切削用。
超微粒合金 Z 種	極めて微細な WC を用いているため高い硬さと高い靱性をもつ。	エンドミル、ドリル等の高能率切削に効果が大い。

図 2-3 に代表的な超硬合金の代表例を示すが、一般的に Co がバインダーの役割をしており、その量によって物性値は異なったものになる。バインダーである Co 量が減少すると母材の硬さは増大するが、逆に靱性は低下する傾向にある。

また、図 2-4 に Co 量と硬さの関係を示すが、WC の粒径を細かくすれば硬さが上昇することが明らかである。

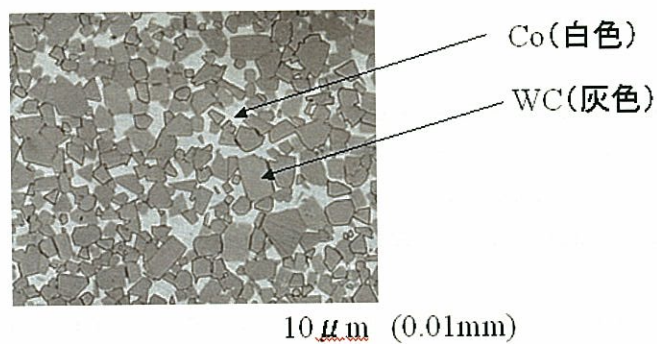


図 2-3 超硬合金の組織例

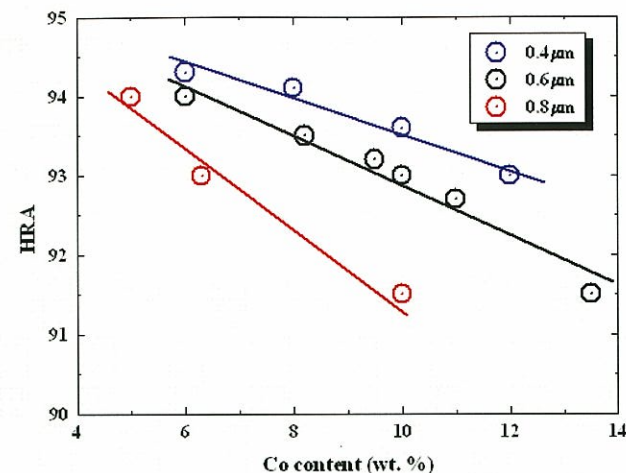
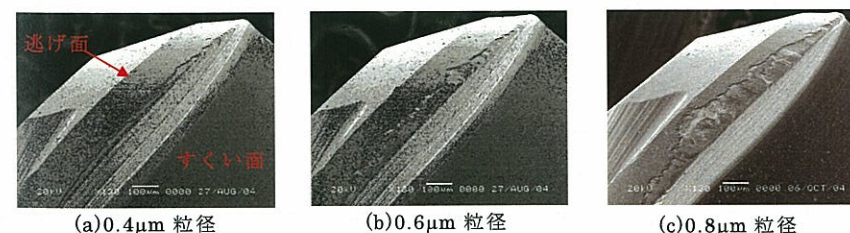


図 2-4 Co 量と硬さの関係

小径エンドミルによる加工において工具突出し量が短い状態で行う場合は、超硬素材の粒子を細かくし、Co 量を減少させた方が耐摩耗性の観点から有効的な手段といえる。図 2-5 に高硬度材である SKD 11 (H) (60 HRC) を刃径  $\phi 2$  mm、首下長さが 3 mm のショートタイプのボールエンドミルで切削した工具切れ刃の摩耗状態を比較した結果を示す。



W=SKD11(H) n=16000min<sup>-1</sup> Vf=1600mm/min ap=0.06mm ae=0.06mm Dry 切削

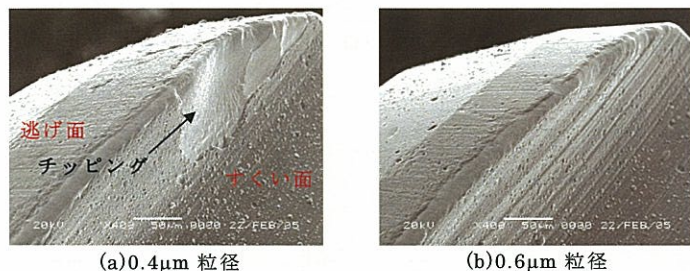
図 2-5 超硬素材粒径の相違による摩耗形態の比較

同図からも摩耗状態としてはすべて機械的摩耗形態を示している。またそれぞれを比較すると超硬素材は粒径を細かくし、硬さを増すことによって耐摩耗性を大幅に改善できる



ことが明白である。

しかしながら、小径エンドミルを用いて深彫り加工を行うと、機械的工具摩耗の進行にともない切削中にびびり振動が発生しやすくなるため、超硬素材の粒子を細かくしてC<sub>o</sub>量を少なくすると、エンドミル刃先がチップングや欠損を起こしやすくなる。図2-6に刃径φ1mm、首下長さが10mmのロングネックタイプのエンドミルで切削したときの摩耗形態を比較したものを示す。



W=SKD11(H) n=20000min<sup>-1</sup> Vf=2000mm/min ap=0.02mm ae=0.02mm Dry 切削

図 2-6 超硬素材違いの摩耗形態(深彫り時)

同図からもわかるように、小径エンドミルによる深彫り加工において、超硬素材の粒子を細かくして硬さが増す反面、靱性が低下したことによってすくい面方向に大きなチップングを生じている。つまり、小径エンドミルによる深彫り加工においては、耐摩耗性だけを考慮した超硬素材の選択では満足できないことが明らかである。

### 2-5-2 工具のたわみの影響

小径エンドミルによる深彫り切削を考えた場合、切削中のエンドミルのたわみが問題になる。工具のたわみは、はりのたわみの理論式からもわかるように、工具そのものが持つヤング率の影響を受けることは明らかであり、工具母材材質が変われば必然的に切削特性は変わることが予想される。ここで、超硬合金のヤング率は、粒径の大きさよりもC<sub>o</sub>含有量によって影響をうけることが知られている。<sup>6)</sup>

すなわち、超硬素材の選択によって工具の摩耗とたわみ量にある程度抑制することができるものと考えられる。

### 2-6 工具形状の影響

図2-7に示すように、エンドミルはコレットチャックを介して片持ち梁の状態の主軸に取付けられるため、切削抵抗の変動に伴って生じる工具のたわみによって振れ回り現象が発生することになる。

背分力によるエンドミル軸心の変位は、被削材の基準位置とのズレを生じ、軸心に沿った外周面は単なる外周包絡線として転写されるわけではなく、うねりを含み、そのうねりは粗さを含んだ複雑な仕上面が形成される。

これらの加工面精度として挙げられる位置のズレ、うねり、粗さ、軸心の傾きなどは切削条件によって変化する。しかし、うねりの大きさは、仕上面粗さに対して数倍から数10倍の大きさになるため、被削材の寸法精度上からも無視できない存在である。つまり、加工面精度を評価する上において仕上げ面粗さだけでは不十分であり、切削加工面のうねりを考慮し、さらには工具のたわみを定量的に示すことが重要になる。

一般的にねじれ角やすくい角、逃げ角等が単独で作用するのではなく、それぞれが複雑に相互作用した結果として切削現象が起こっている。特に、刃径がφ3mm以下の小径エンドミルにおいては、それら切削現象とともに工具のたわみによる大きなびびり振動が発生し、さらに複雑な状態にしている。

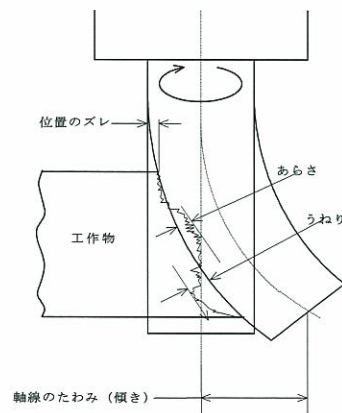


図 2-7 エンドミルによる加工面精度

小径エンドミルにおいては、刃径はシャンク径よりも小さく、図2-8に示すように刃部とシャンク部はテーパで繋がれている。

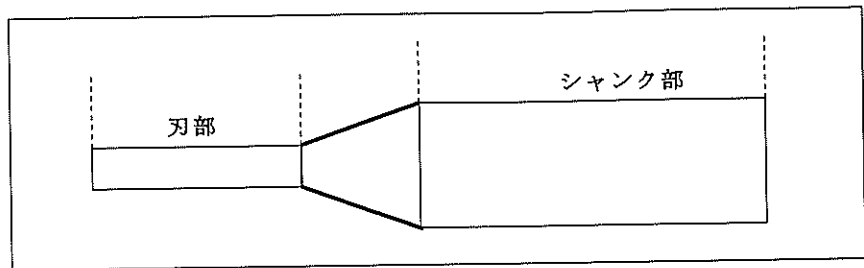


図 2-8 小径エンドミルの外観断面

このような小径エンドミルにおいて、大きな問題となるのは次に述べる二つがある。  
一つは折損問題である。上述のように刃部がシャンク部に対して細くなっているため、切削中に切削抵抗が作用すると首部に応力が集中して折損しやすくなる。

二つ目は工具のたわみによる加工精度の悪化である。エンドミルは、コレットチャックを介して片持ち梁の状態で主軸に取り付けて使用されるため、切削抵抗の変動に伴って生じるたわみによって触れ回り現象を発生することになる。この現象は、深い部分の加工になれば、すなわちアスペクト比の高いエンドミルを使用すればするほど大きく発生し、切削中のびびり振動によって加工精度は悪化する。

また、背分力によるエンドミル軸心の変位は、被削材の基準位置とのズレを生じるため、軸心に沿った外周面は単なる外周包括線として転写されるわけではなく、これにうねりを含み、そのうねりは粗さを含んだ複雑な仕上げ面が形成され、仕上げ面粗さも当然悪くなる。

以下に、仕上げ面粗さの悪化によって生じる不具合について示す。

- 1) 他の部品との摩擦接触において摩擦係数が大きくなる。また、ドライの状態では引きかけ摩擦抵抗が増大し、潤滑油を使用する場合には油膜が破断されやすくなる。
- 2) 同一体積の摩耗に対して寸法変化が大きくなる。
- 3) レンズや反射鏡などの光学的機能の低下を招く。
- 4) 繰り返し応力を受ける部品では疲労強度が低下する。
- 5) 仕上げ加工を行う場合には、取りしりを大きく取らなければならない。

## 2-7 切削実験

小径ボールエンドミルを用いた深彫り切削加工の問題点を明確にするため、高硬度材の

隅部の加工を実施した結果について述べる。

### 2-7-1 実験方法

高速主軸を要したマシニングセンタ（株式会社 研削野フライス製作所 V33）にエンドミルを取付け、切削を行った。また、被削材にはプラスチック金型用鋼に広く用いられている焼入れ焼戻し鋼 SUS420J2 相当材（STAVAX、HRC52）を用いた。加工形状は深い隅部の加工を想定し、図 2-9 に示すような被削材形状の加工を行った。

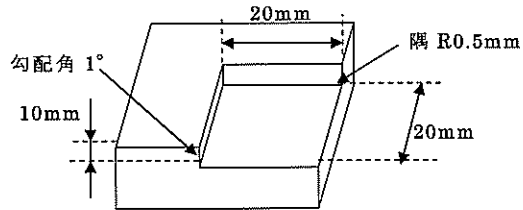


図 2-9 加工形状

また、本実験で用いた小径ボールエンドミルの仕様を表 3-2 に示す。さらに、実験条件は表 3-3 に示すように設定した。

表 3-2 供試小径エンドミルの仕様

刃先 R mm	0.5
刃径 D mm	1
首下長さ ln mm	16
刃長 l mm	0.8
首径 dn mm	0.96
シャンク径 d mm	4
全長 L mm	50



表 3-3 切削条件

回転数 min <sup>-1</sup>		1 3, 0 0 0
切削速度 m/min		4 0
送り速度 mm/min		7 8 0
一刃送り mm/tooth		0 . 0 3
切込み量	Y 方向 mm	0 . 0 1 5
	Z 方向 mm	0 . 0 4 5
切削時間 分		1 8 0
被削材		STAVAX (52HRC)
切削方式		Down Cut, Dry Cut

## 2-7-2 実験結果および考察

切削後のボールエンドミル摩耗状態を示した写真を図 2-10 に示す。同図から、ボール刃先端にチッピングが生じていることが確認できる。また、逃げ面方向への摩耗状態が極めて不均一であることから、切削中にボールエンドミルがびびり振動を発生して不安定な加工状態になっていることが予想される。

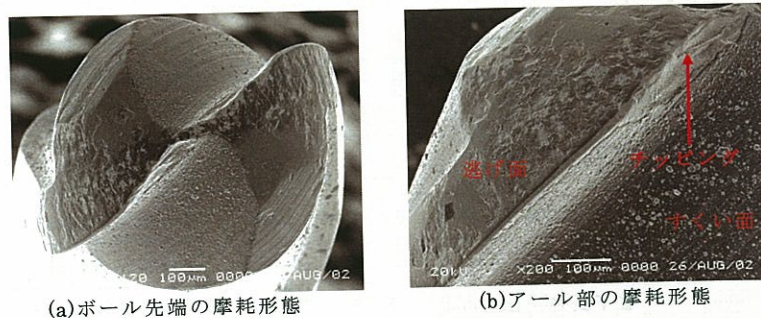
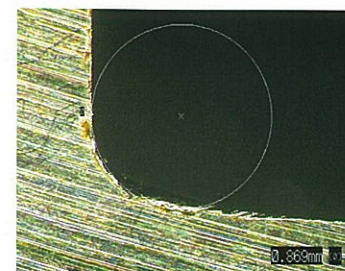


図 2-10 切削後のエンドミル摩耗状態

一方、切削後の被削材の隅アール部の測定結果と加工面性状の写真を図 2-11 に示す。同図からもわかるように、切削後の隅部アール寸法を測定すると、設定値の  $R0.5\text{mm}$  に対して  $R0.869\text{mm}$  と大きくなっていることがわかる。すなわち、切削中にエンドミルがたわ

んで触れ回りを生じ、削り残しを発生していることによるものである。さらに加工面性状の観察からもカッターマークが不均一でエンドミルのたわみが大きく発生していることが確認できる。



(a)隅アール部の測定結果



(b)隅アール部の面性状

図 2-11 加工物の観察

さらに加工後の被削材の勾配面を非接触 3 次元測定機で測定した結果を図 2-12 に示す。

同図をみると、加工面に多数の段差が生じており、これはエンドミル軸心の変位が、被削材の基準位置とのズレを生じ、軸心に沿った外周面は単なる外周包絡線として転写されるわけではなく、うねりを含み、そのうねりは粗さを含んだ複雑な仕上面が形成されていることによるものと考えられる。

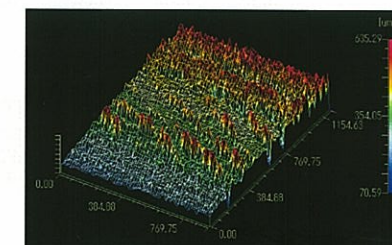


図 2-12 勾配面の測定

## 2-8 結言

エンドミルの基本的な切削特性について述べ、エンドミルの切削性能に左右する因子について述べ、それぞれの因子が小径エンドミルの深彫り切削加工に対してどのような役割と問題点があるかを明らかにした。

小径エンドミルによる深彫り切削加工において、

- (1) 刃部がシャンク部に対して細くなっているため、首部に応力が集中して折損する。
- (2) 加工中のたわみによって設定寸法に対して削り残しを発生する。
- (3) 加工中の工具たわみやびびり振動によって、エンドミル軸心の変位が被削材の基準位置とのズレを生じて加工面精度を悪化させる。

さらに、小径エンドミルの深彫り切削加工における超硬素材の粒径、C<sub>o</sub>量の最適化の必要性および高精度加工を行うための問題点についての指針を得た。

## 参考文献

- 1) 松岡甫堯：機械と工具，Vol.49No.9，(2003)14.
- 2) 高橋一郎，安斎正博：精密工学会誌，第65巻第6号，(1999)867.
- 3) 山田眞次郎，神雅彦：精密工学会誌，第69巻第7号，(2003)939.
- 4) ツールエンジニア編集部編著：エンドミルのすべて 大河出版 1988
- 5) 狩野勝吉：難作材の切削加工技術 工業調査会 1989
- 6) 鈴木壽：超合金と焼結硬質材料 基礎と応用，丸善株式会社，(1991)134.

## 第3章 小径エンドミルの折損対策とその評価

## 3-1 緒言

近年の金型製作において、小径ボールエンドミルの使用用途が急激に増えてきている。これは、工作機械の高精度化、高速化、CAD/CAM機能の発達、切削工具の高精度化および長寿命化が実現したことによるものである。<sup>1)</sup> しかしながら、それに伴い従来は放電加工で行っていた金型の深部の加工を行う必要性が生じ、その高精度化を図るために小径エンドミルがますます重要な切削工具になってきている。

金型の切削方法は、図3-1に示すような等高線切削が主流となっている。<sup>2)</sup> 特に、仕上げ加工を行う場合には工具の軸直角方向への切削抵抗によって金型精度に悪影響を及ぼす場合がある。

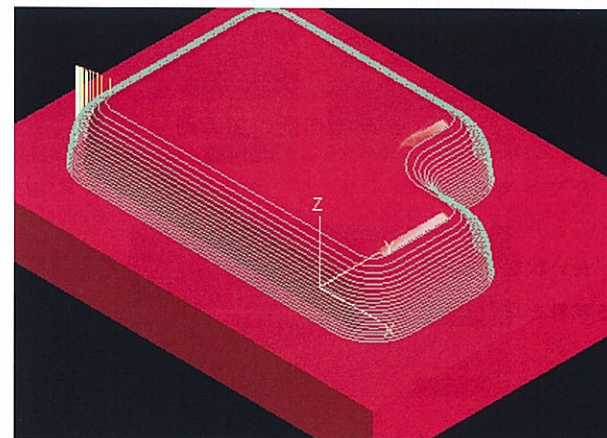


図3-1 等高線仕上げ切削の加工例

このように工具の軸直角方向に切削抵抗が作用して切削加工が行われると、工具にかかる負荷は蓄積されることになる。特に小径エンドミルを用いて金型の深部の切削加工を行うと、応力はエンドミルの首部に集中して折損に至る場合も多々ある。

また、金型の加工においては図3-2に示すような隅部の加工が多く存在するが、このよ



うな場合には、工具突出し量を長くして小径ボールエンドミルを用いて加工することになる。つまり、小径ボールエンドミルの用途としては、工具突出し量を長くしたアスペクト比の高い状態で加工を行うことになる。

そこで本章では、工具突出し量の長い小径ボールエンドミルを用いた切削加工を想定し、エンドミルの首部形状が加工負荷によってどのように影響を受けるかを実験的に検討した。

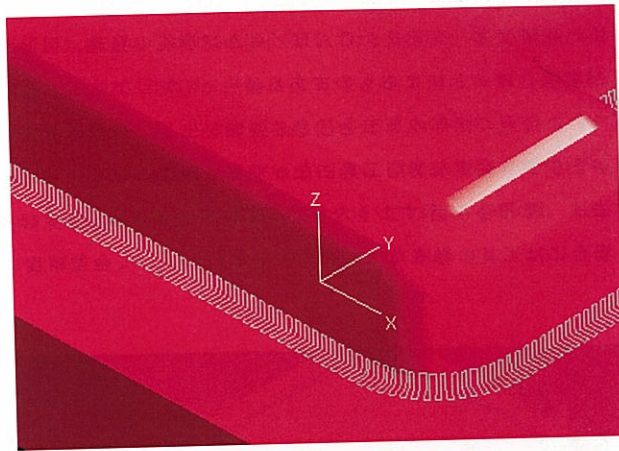


図 3-2 隅部切削の加工例

### 3-2 実験内容

工具突出し量が長い状態で加工を行う際の工具たわみと折損との関連性を調べるために、首部形状の異なる試料を用いて静荷重実験を行った。

#### 3-2-1 実験用試料

前述のように、本研究に使用する小径ボールエンドミルの用途は金型の深部の加工が多く、その際に工具軸直角方向への荷重に対してどのような工具たわみを生じるかを実験的に検討した。本実験ではまず、工具切れ刃形状の影響を受けずに行うために、円筒段付形状品を使用した。円筒段付形状品とは、刃部とシャンク部を首部であるテーパで結合したもので、この刃部には切れ刃を設けていない。図 3-3 に実験で使用した試料の寸法を示す。また実加工においては、応力が最も集中する刃部と首部の付け根で折損を起こすため、本実験では図 3-4 に示すような首部の形状の異なる 3 種類の試料を用いて実験を行った。

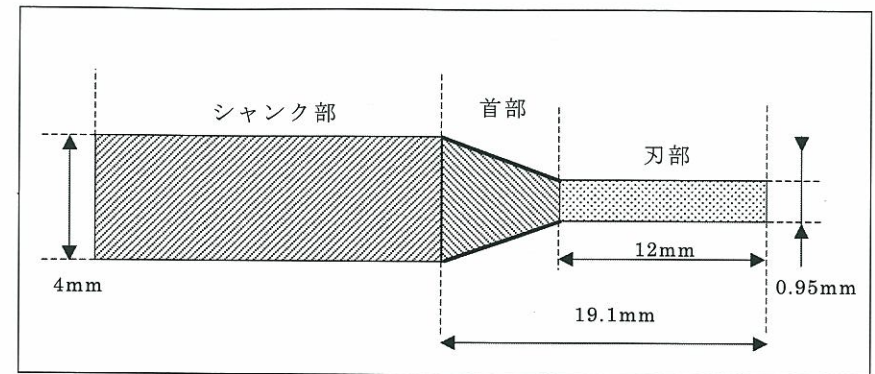


図 3-3 実験用試料の寸法

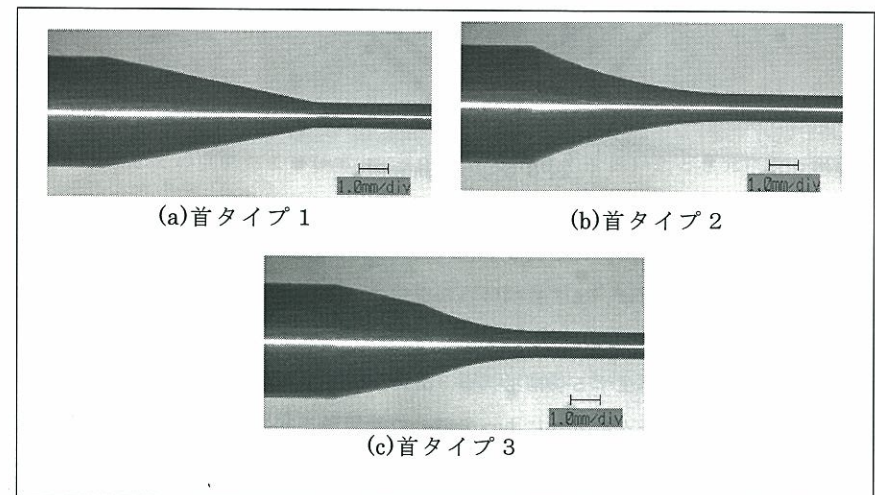


図 3-4 実験用試料の首部形状

## 3-2-2 実験装置およびその方法

実験装置の概略図を図3-5に示す。実験にはマシニングセンタを使用し、実験用試料は前節に示した3種類の首形状の円筒段付形状品を使用した。

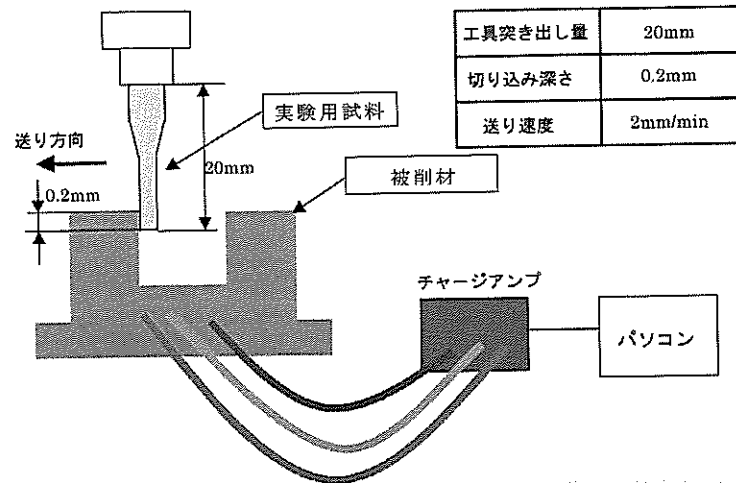


図3-5 実験用装置

マシニングセンタに実験用試料を装着し、同図に示すように3分力動力計を用いて静的負荷を測定した。実験方法は、まず被削材に穴を設け、その中に実験用試料を被削材表面から0.2mmの深さまで入れ、その状態で回転させずに送り速度が2mm/minで被削材に接触させ、その時に発生する切削抵抗を3分力動力計で測定した。それらから得られる電圧変化をアナログデータロガーによって同一の時間軸で測定・記録した。この測定は、実験用試料が折損するまで続行してそれぞれの切削抵抗を計測した。

## 3-3 実験結果および考察

実験用試料が被削材に接触すると、急激に切削抵抗は増大する。その際に折損するまでの背分力を測定することによって時間と耐荷重との関係が求まり、それらによってそれぞれの首形状の相違による耐折損性の評価が可能になる。

基本的には首タイプ1の場合には刃部と首部の付け根部分に応力が集中するため、折損

しやすくなる。逆に、首タイプ2のように刃部と首部を曲線で結合すれば、応力が分散されることによって折損しにくくなる。つまり耐荷重は増加する。しかし、試料そのものの等価直径が変化することになるため、試料のたわみが増大することが予想される。

ここで、はりのたわみは次式で表される。

$$\sigma = \frac{PL^3}{3EI} \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

但し、E：試料のヤング率

$$I : \text{中実丸棒の断面二次モーメント} \left( I = \frac{\pi d_L^4}{64} \right)$$

$d_L$ ：突き出し量Lの等価直径

P：切削抵抗

L：突き出し量

上式で表されるヤング率は工具母材によって異なる。固体の運動は、全体としての並進運動、剛体としての回転およびひずみに大別される。外力を除いたとき元に戻る限度内のひずみを扱うのが弾性体の力学である。金属などの固体に力を加えると固体は変形し、この応力によって生じた微小変形が“ひずみ”である。これは固体内部に応力を生じ、応力とひずみとがつりあうため、図3-6に示すように応力とひずみの間にはある関係が成立する。“ヤング率”とは、伸びの弾性率や縦弾性率ともいわれる弾性率で、材料が弾性的に挙動する場合の応力Sとひずみaの比であり、定数Eで表わされる。すなわち、応力-ひずみ曲線の初期の傾斜

$$E = \Delta S / \Delta a$$

がヤング率である。このEは材料の強さの尺度となり、応力とひずみが直線関係ない場合にはEは傾斜の接線、または2点間を結ぶ直線で近似される。引張変形の場合を特にヤング率と呼ぶが、多くの場合には圧縮の弾性率も同等値となる。<sup>9)</sup>

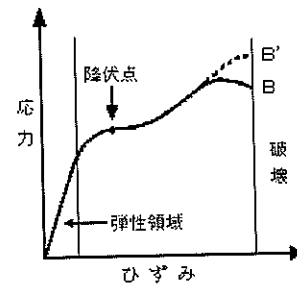


図 3-6 応力-ひずみ線図

本実験で使用した試料の超硬合金のヤング率は 470Gpa である。

ここで、それぞれの首部形状の相違による測定結果を図 3-7 に示す。これより、折損の最大荷重に大きな差異が認められる。

同図より、首タイプ 1 の試料は最も早くに折損している。逆に、首タイプ 2 の試料が最も遅くに折損していることがわかる。ここで注目すべきは、首タイプ 2 と首タイプ 3 の耐荷重の値がほぼ同等ということである。このグラフは時間軸と耐荷重の関係であるから、傾きが大きいほど工具はたわみにくくなるということになる。

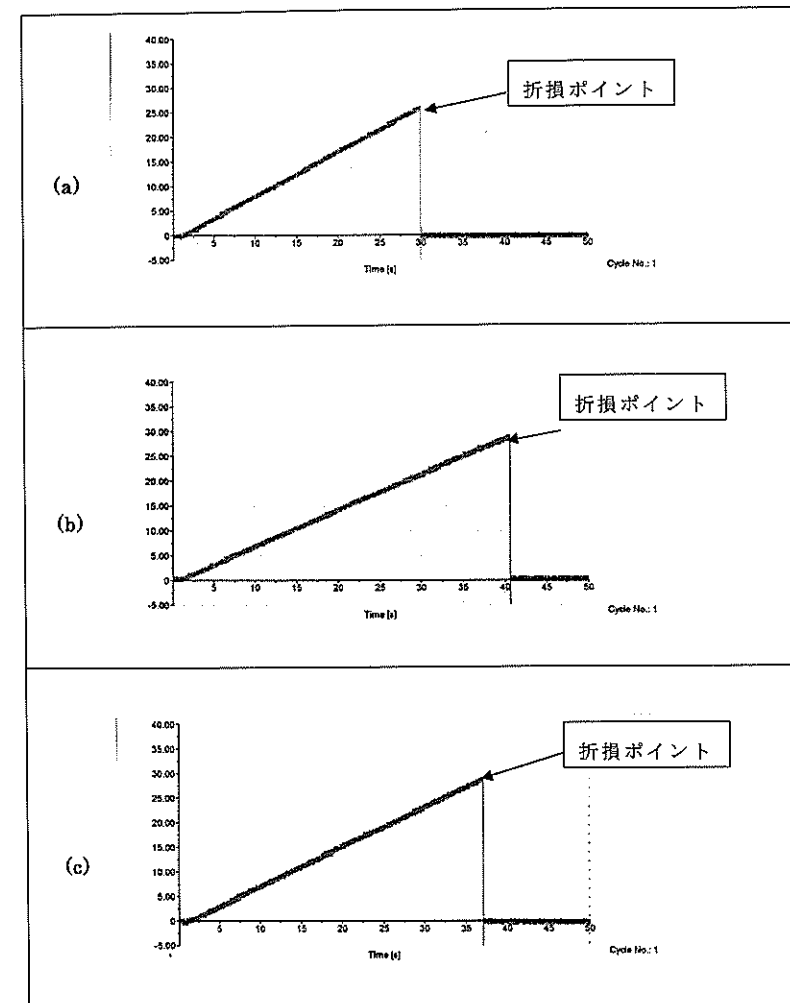


図 3-7 耐荷重測定結果

ここで、図 3-8 に試料の変位量と耐荷重との関係を示す。これより、首タイプ 2 は応力分散の効果が現れているものの、それ以上に等価直径の低下によるたわみ量の増大を引き起こしていることがわかる。また、首タイプ 1 は最も等価直径が大きくて抵抗値も低いことから、理論的に工具たわみ量が最も少なくなるが、その分だけ耐荷重が低くなる。それに対して、首タイプ 3 の試料は耐荷重が高い割には工具たわみ量は大きくないことがわかる。ここで、表 3-1 にそれぞれの首形状の等価直径を示す。この表からわかるように、応力分散の効果を発揮して等価直径を確保することにより、工具の耐折損性に優れ、かつたわみ量を抑制することが可能といえる。

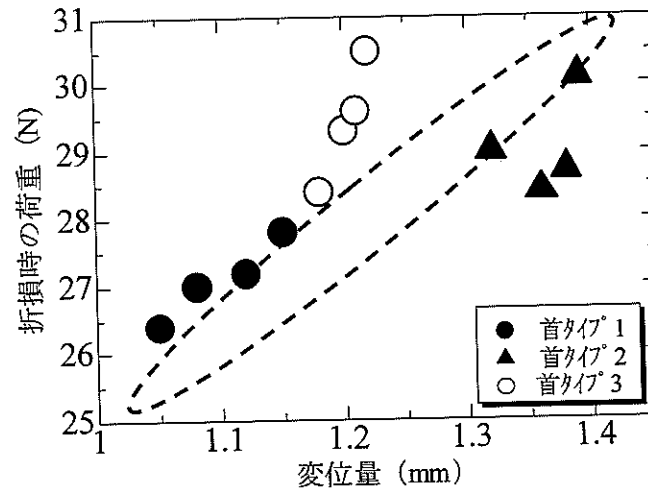


図 3-8 変位量と耐荷重の関係

表 4-1 それぞれの首形状の等価直径

	等価直径 mm
首タイプ 1	1.622 mm
首タイプ 2	1.445 mm
首タイプ 3	1.562 mm

### 3-4 結言

本章では、小径エンドミルで深彫り切削を行うために必要なロングネックタイプの工具の問題点である折損問題について検討してきた。その中で、等価直径の確保と切削時の応力分散の考え方から以下の結論を得た。

- (1) 小径エンドミルは刃部とシャンク部の寸法が異なることから、首部に応力集中しやすく、切削中に切削抵抗の作用によって折損にいたることがあり、首部にアールを設けることが有効である。
- (2) 工具のたわみは、はりのたわみ式からも等価直径に起因することから、等価直径を大きく減じることができない。
- (3) 首タイプ 3 のアールと直線からなる首形状が適する。

## 参考文献

- 1) 松岡甫筈：機械と工具，Vol.49No.9，(2003)14.
- 2) 武藤一夫：金型設計・加工技術 日刊工業新聞社 1995.
- 3) 竹園茂男：基礎材料力学 株式会社朝倉書店 2000.

## 第4章 工具突出し量が加工精度に及ぼす影響

### 4-1 緒言

小径エンドミルを用いた切削加工において、その加工精度を左右する要因にはさまざまなことが考えられる<sup>1)</sup>。特に、その中でも大きな要因として考えられるのがエンドミルの突出し量である。一般に、工具突出し量が長い状態ではエンドミルの剛性が低下するために著しく加工精度が低下するとされており、エンドミルによる切削加工ではエンドミルを“より短く”、“より太く”することによって剛性を確保し、安定した切削加工を可能にしている<sup>2)</sup>。

エンドミルの突出し量が長い状態で切削加工を行うと、一般的に工具たわみ量は増大すると言われているが、刃先にどのような切削力がかかっているのか、その結果工作物表面性状がどのようになるのかなど工具のたわみを引き起こす要因を具体的に報告した研究はほとんど見当たらない。

そこで本章では、工具突出し量が切削現象にどのような影響を及ぼしているのかを実験的に検討する。すなわち、エンドミルの突出し量をパラメータにとり、切削中におけるエンドミルの挙動、切削抵抗、切削後の工作物の形状誤差および表面粗さを測定し、加工精度が低下する要因と切削条件の関連を追求する<sup>3)</sup>。特にエンドミルの挙動は、図4-1に示すような、垂直方向に取り付けられた片持ち梁に見立てることができることから、“はりのたわみ”式を利用することによって、理論的な工具剛性と突出し量との関係を明確にし、形状誤差に対してどのように影響を及ぼしているかを体系的に検討する。



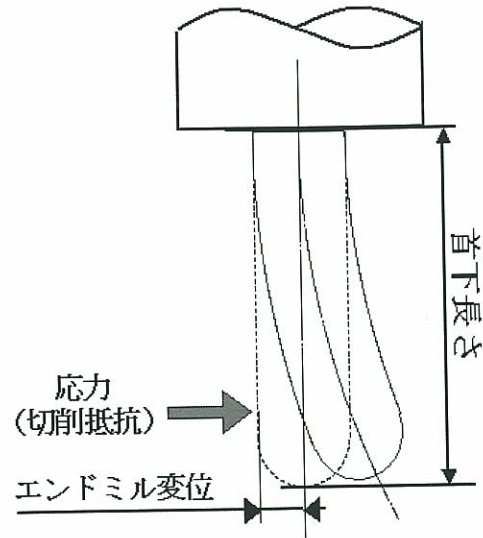


図 4-1 はりのたわみ

#### 4-2 実験内容

はりのたわみから求まる理論的な工具剛性とエンドミルの突出し量が、形状精度にどのように影響するかを明らかにするために以下のプロセスで実験を実施した。

- ① 工具突出し量を変化させ、同一切削条件で切削することにより、エンドミルの挙動がどのように変化するかを把握する。
- ② 突出し量を変化させた場合の切削抵抗を測定し、はりのたわみ式から理論的な工具剛性を導出する。
- ③ 切削後の工作物の形状誤差を測定し、工具剛性の影響を調べる。
- ④ 工具突出し量の相違による切削抵抗の波形からエンドミルの振動挙動を調べる。

以下、各プロセスで行った実験について述べる。

#### 4-3 実験装置および工具

図 4-2 に示すようにマシニングセンタ(大阪機工 株式会社 PCV-40)の主軸部に高速回転可能なリュータースピンドル(日本精密機械 株式会社 HS2200)を取り付け、小径ボールエンドミル(材質:超硬合金 被膜:CS コート)を装着して切削実験を行った。リュータースピンドルを使用する理由としては、小径ボールエンドミルの切削加工に適した高速回転を得るためにマシニングセンタの最高回転数を  $5000\text{min}^{-1}$  から  $20000\text{min}^{-1}$  にまで引き上げなければならないことによるものである。

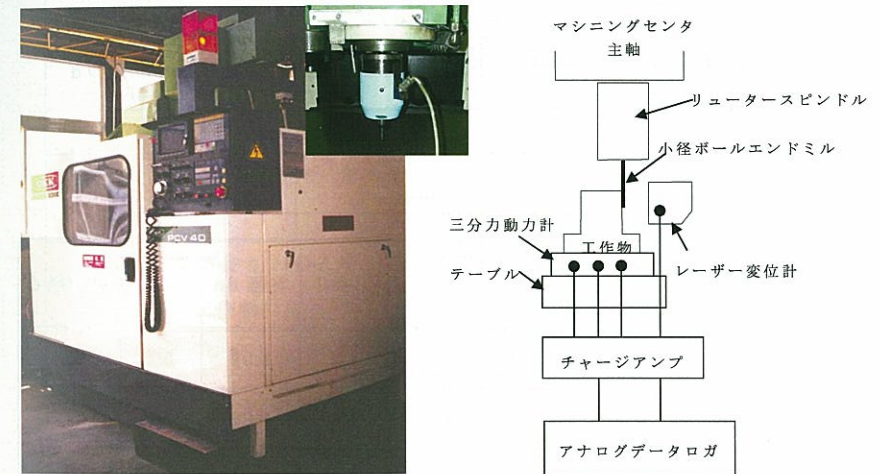


図 4-2 実験装置の外観図

小径ボールエンドミルの首下長さを変化させたときの切削抵抗を三成分動力計(日本キスラー 株式会社 9257A)を用いて測定した。実験時におけるデータサンプル収集条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 データ収集条件

サンプリング周期	100 ( $\mu\text{m}$ )
サンプリング数	750 (個)
入力範囲	$\pm 2.5\text{V}$



また、本実験に使用した小径ボールエンドミルの仕様は図4-3に示す通りであり、前章における実験結果をもとに最適な首形状を採用した小径ボールエンドミルを使用することにした。

工作物は、実際の金型加工を想定して、射出成形金型に使用されている焼き入れ焼き戻し鋼 SUS420J2 相当材 (STAVAX, HRC52) を使用した。切削実験には図4-4に示すような所定の寸法・形状に予め加工したものを使用し、切削時にたわみの影響を最も受けやすい側面切削を採用した。

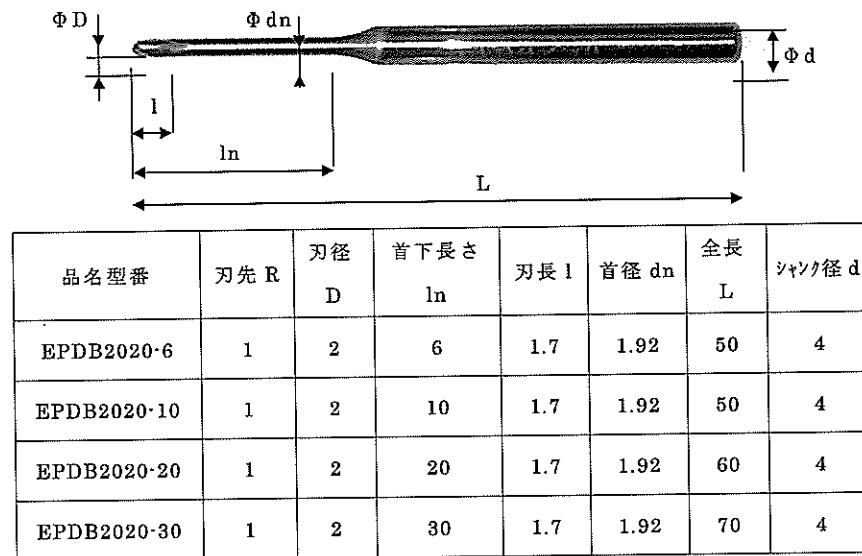


図 4-3 小径ボールエンドミルの形状と仕様

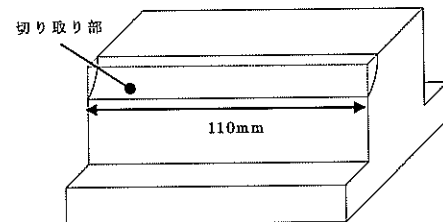


図 4-4 工作物の形状

#### 4-4 実験条件および方法

表4-2に実験条件を示す。使用した小径ボールエンドミルの首下長さはそれぞれ6mm, 10mm, 20mm, 30mm のものである。これらの小径ボールエンドミルの首下長さが切削時のどのような影響を与えるかを測定するために、切込みおよび切削速度を一定とし、Z方向に切込みを与えながら工具突出し量のみを変化させて切削実験を行った。

表 4-2 実験条件

回転数 $\text{min}^{-1}$		8000
切削速度 $\text{m/min}$		50.24
送り速度 $\text{mm/sec}$		480
一刃送り $\text{mm/tooth}$		0.03
切込み $\text{mm}$	Y 方向	0.5
	Z 方向	0.05
首下長さ $\text{mm}$		6, 10, 20, 30
工作物材質		SUS420J2 相当材 (STAVAX, 52HRC)
切削方法		ダウンカット
切削方式		ドライ

マシニングセンタのテーブル上に STAVAX 鋼の工作物を固定し、切り取り部とテーブルの送り方向が水平になるようにレーザー変位計を用いて調整した。表4-2に示した実験条件のもとで切削加工を行い、三成分動力計を使用して切削時の切削抵抗を測定し、実験値としては各方向成分の合力を採用した。また、切削時に生成した切りくずを採取し、その長さを測定した。

金型加工において品質上最も重要となる評価パラメータは、工作物の形状精度および仕上げ面粗さである。金型はその形状がそのまま成型部品に反映されるため、特にこの2点が重要になる。したがって本章を含め、本研究においては評価対象として形状誤差および仕上げ面粗さを用いている。

まず、形状誤差を評価するために、実質切込み比率を定義した。図4-5に示すように、実際の切削加工ではエンドミルに切削力が作用し、たわみを発生するためマシニングセン

タの設定切込み量に対して実質の切込み量は少なくなる。すなわち、削り残しを発生することになる。そこで、次式によって実質切込み比率を求め、それによって形状誤差の評価を行った。

$$\text{実質切込み率 (\%)} = \frac{\text{実質切込み(mm)}}{\text{設定切込み(mm)}} \quad \dots\dots (4.1)$$

(実質切込み = 設定切込み - 形状誤差)

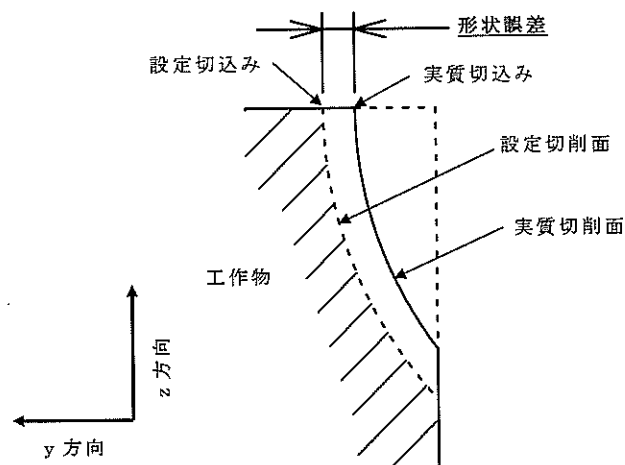


図 4-5 形状誤差の定義

一方、仕上げ面粗さは、切削送り方向と同一方向に測定した値を用いた。図 4-6 に本実験に使用した仕上げ面粗さの測定模式図を示し、最大高さ粗さ Rz を採用している。

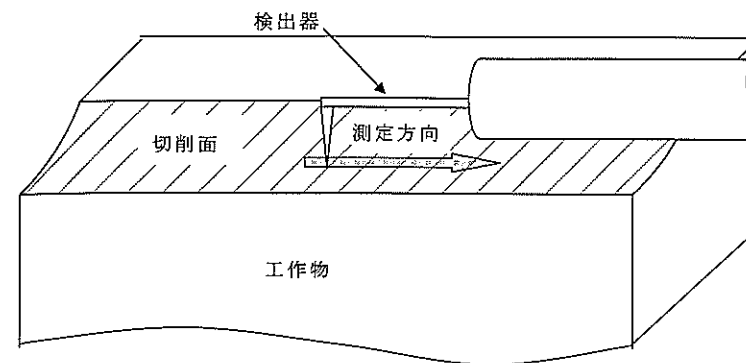


図 4-6 仕上げ面粗さの測定模式図

## 4-5 実験結果および考察

## 4-5-1 工具突出し量が形状精度におよぼす影響

図4-7は、首下長さの異なるエンドミルによって切削したときの切削抵抗および生成された切りくず長さの関係を示したものである。この図からわかるように、エンドミルの首下長さが長くなるにしたがって切削抵抗が減少していることが明らかである。これは、首下長さの増大に伴う小径ボールエンドミルの剛性の低下により、工具たわみ量が增大してエンドミル一刃当たりの切り取り量が減少したこと起因するものと考えられる。このことは、同図の生成された切りくず長さの変化からも明白である。

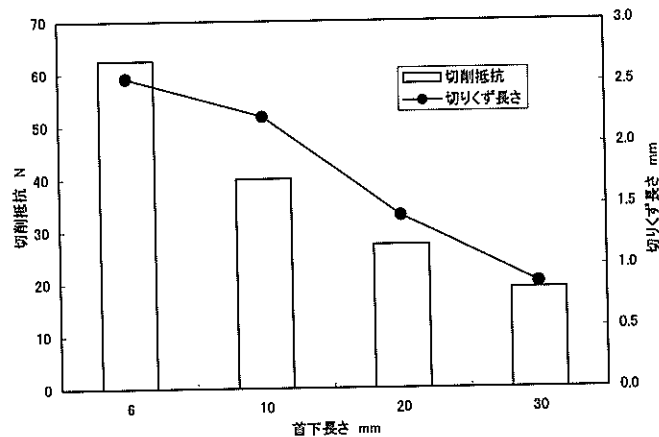


図4-7 首下長さと切削抵抗および切りくず長さの関係

工具突出し量の増大、すなわち首下長さの増大とともに小径ボールエンドミルで生成された切りくず長さが減少するのは、首下長さの増加によってエンドミルの剛性が低下したことによるものである。この剛性の低下については、はりのたわみ式から確認することができる<sup>4)</sup>。

すなわち、式(4-1)を変形すると

$$\sigma = K \cdot P \quad \left( \text{但し、} K = \frac{64 \cdot L_n^3}{3E \cdot \pi d n^4} \right) \dots (4-2)$$

のように表すことができ、式(4-2)の比例定数  $K$  がエンドミルの曲げ剛性を表している。この式より、首下長さ  $L$  をパラメータに取ってエンドミルの剛性を求めると、図4-8のようになる。この図から、エンドミルの首下長さの増大とともに工具剛性が低下していることは明らかであり、これが切りくず長さの減少をもたらし、すなわち実質切込み量の減少の要因になるものと考えられる。

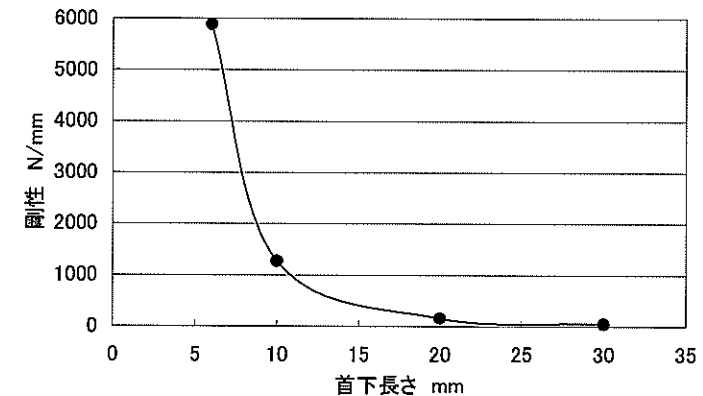


図4-8 首下長さが剛性に及ぼす影響

次に、エンドミルの首下長さの変化に伴う形状誤差を定量的に評価するために、切削後の工作物の実質切込み量を測定し、設定切込みに対する比率、すなわち実質切込み比率として比較を行った。その結果を図4-9に示す。この図は工具剛性と実質切込み比率との関係を示しており、剛性が約6000N/mmである首下長さ6mmの状態では、ほぼ設定切込み通りに切削加工が行われているが、工具剛性の減少にしたがって実質切込み率も減少していることがわかる。このことから、首下長さの増大にともなう小径ボールエンドミルのたわみ量は非常に大きなものであり、加工精度に対して深刻な影響を与えられと考える。

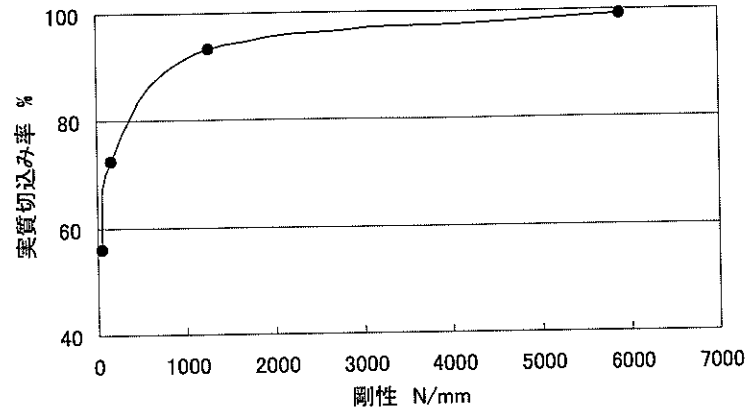
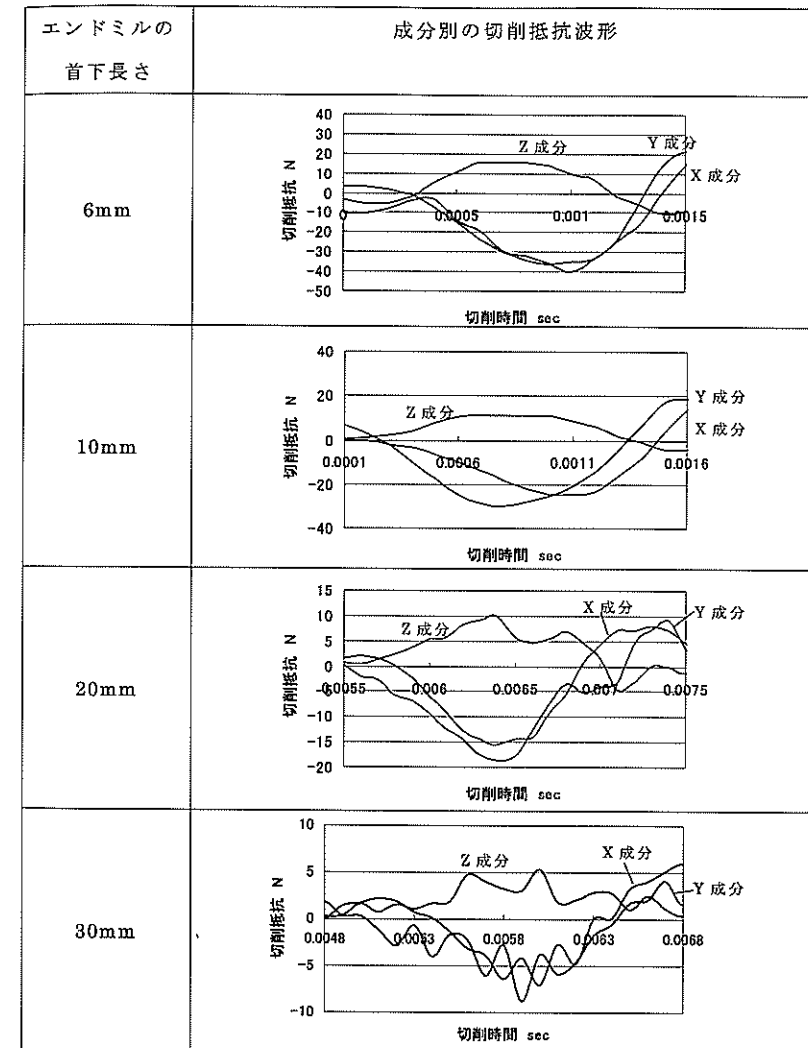


図 4-9 工具剛性と実質切込み比率の関係

#### 4.5.2 工具突出し量がびびり振動に及ぼす影響

表 4-3 は、エンドミルの首下長さを変化させた場合の切削抵抗の各成分の波形を示したものである。エンドミルの首下長さが 6mm および 10mm においては、切削抵抗の各成分ともに一刃当たりの切削面積の変化に対応した比較的安定した波形となっていることがわかる。しかし、首下長さが 20mm になると切削抵抗の各成分はやや不安定な波形となり、首下長さ 30mm ではびびり振動を発生していることが明確に確認できる。

表 4-3 各首下長さにおける成分別切削抵抗波形



この原因として、切削時のエンドミル回転数と各首下長さにおけるエンドミル自身の固有振動数が漸近したことによって発生した共振が考えられる。そこで、次式で表される計

算式により各首下長さにおける固有振動数を計算した。その結果を図4-10に示す。

$$fn = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{M}} \quad \dots (4-3)$$

但し、fn：固有振動数

E：試料のヤング率

I：中実丸棒の断面二次モーメント

M：物体の重量

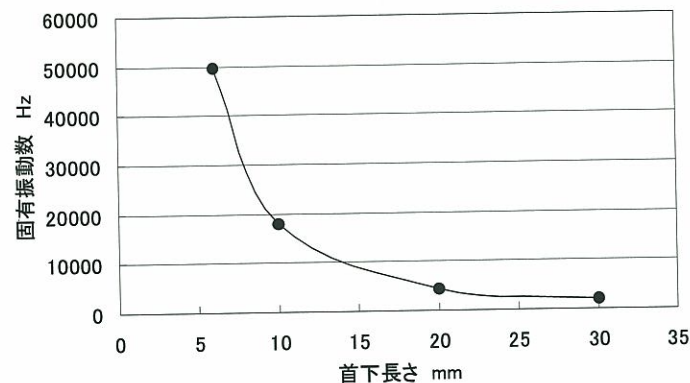


図4-10 首下長さと固有振動数の関係

この図より、エンドミルの首下長さが6mmおよび10mmにおいてはかなり高い固有振動数を示しているが、首下長さが20mmおよび30mmに増大すると固有振動数はそれぞれ約4400Hz、2000Hzと極端に低くなっており、エンドミルの回転周波数に近づくため、切削時に共振が発生している可能性が高いと言える。

また、図4-11は、エンドミルの首下長さを変化させた場合の加工面性状および表面プロフィールを示したものである。同図からもわかるように、エンドミルの刃径と首下長さのアスペクト比が小さい6mmのエンドミルでは加工面性状が安定しており、一刃あたりのカッターマークがほぼ均一に転写されていることが明らかである。しかしながら、首下長

さ10mmを越えると急激に加工面性状は悪化しはじめていることがわかる。これは、エンドミルの剛性の低下に伴って同一切削条件下において切削加工を行う場合には、固有振動数の極端な減少の影響が現れてびびり振動が助長されたことに起因するものと考えられる。

	加工面性状	表面プロフィール
首下長さ 6mm		
首下長さ 10mm		
首下長さ 20mm		
首下長さ 30mm		

図4-11 首下長さ違いによる加工面性状および表面プロフィール

## 4-6 結言

本章では、工具突出し量が切削現象に対してどのような影響を及ぼしているのかを実験的に検討した。すなわち、エンドミルの突出し量をパラメータにとり、切削中におけるエンドミルの挙動、切削抵抗、切削後の工作物の形状誤差および表面粗さを測定し、加工精度の低下要因を追求し、以下のことが明らかとなった。

- ① 同一切削条件下で加工を行う場合、エンドミル突出し量が增大すると工具剛性の低下によって実質切込み比率が急激に減少する。
- ② エンドミルの突出し量が增大すると固有振動数が極端に減少するため、びびり振動を発生して仕上げ面性状を著しく劣化させる。

これらのことから、エンドミルの突出し量の増大に伴う、切削条件の最適化を検討し、さらに工具形状によって工具剛性の低下を補う必要性があることが明らかになった。したがって次章では、切削条件の影響をより詳細に検討する。

## 参考文献

- 1) 松岡甫篁：機械と工具，Vol.49No.9，(2003)14.
- 2) 宮口孝司，嶽岡悦雄：精密工学会誌，第67巻第3号，(2001)450.
- 3) 森田昇，吉田嘉太郎：日本機械学会論文集(C編)(1997)269.
- 4) 松村隆，村山孝博：精密工学会誌，第65巻第11号，(1999)1617.
- 5) 竹園茂男：基礎材料力学 株式会社朝倉書店 2000.

## 第5章 切削加工条件が加工精度に及ぼす影響

## 5-1 緒言

前章においては切削条件を一定にし、工具突出し量が切削特性に及ぼす影響について明らかにした。その結果、工具突出し量の増大、すなわちエンドミルの首下長さの増大に伴って加工精度が悪化することが確認された。

エンドミル加工をはじめとして他の多くの切削加工は、切削加工条件の変化によって全く異なった切削挙動を示すことが報告されている<sup>1)2)3)</sup>。その中でも、切削速度や切込みなどの切削パラメータは、同一の工作物材質、同一の工具であっても切削抵抗などに大きな影響を及ぼし、その結果として工作物の加工精度に対しても大きな影響を与えることになる。さらに加工環境によっても切削現象は大きく異なり、工作物材質が変われば、加工精度は当然異なった結果となる<sup>4)</sup>。したがって、実際の生産現場において適用されているほとんどの切削加工条件は経験的に得られた最適加工条件に頼っている。

しかしながら、首下の長い小径エンドミルによる切削加工においては、通常のエンドミルと比較して形状誤差および表面粗さの両面から劣ることは前章の結果からも明らかである。

そこで本章では、エンドミルの首下長さを固定し、工作物材質として前章と同様のS T A V A X (S U S 4 2 0 J 2 相当材)を採用し、切削加工条件を変化させた場合の切削特性を実験的に検討する。

5-2 切削加工条件<sup>5)</sup>

エンドミル加工において、エンドミルの切れ刃は摩耗、折損、溶着を生じるため、加工面には粗さ、うねりあるいは傾きを発生する。したがって、切削加工条件の適正な選定が必要となるが、何を対象に切削加工条件を決定するのかが大きな問題となる。

切削加工条件の選定に際して考慮しなければならない項目は多く存在するが、必要最小限の切削加工条件としては、以下の6項目に集約される。

- ① 工作物材質
- ② 工具材質

- ③ 切削速度
- ④ 切取り厚さ
- ⑤ 切込みと送り速度
- ⑥ 切削油
- ⑦ 切削方向

本研究では、工作物材質を高硬度材であるSTAVAX (SUS420J2相当材) を用いているが、小径ボールエンドミルを用いた深彫り切削においては、特に切削加工条件として切削速度、切取り厚さ、切込みおよび送り速度が重要なファクターとなる。

以下にそれぞれの切削条件について述べる。

#### 5-2-1 切削速度

切削速度  $v$  (m/min), 回転体直径  $D$  (mm), 回転数  $N$  (rpm) の間には、次の式が成立する。

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{1000} \cong \frac{D \cdot N}{320}$$

切削速度が上昇すると、刃先温度が上昇し、せん断応力が減少するために摩擦角も減少し、せん断角が増加して切削抵抗が減少する。しかし、低切削速度で構成刃先を発生すると、このような傾向から外れて切削抵抗は減少する。また、脆性材料の切削加工においては切削抵抗は切削速度によってほとんど変化しない。

#### 5-2-2 切取り厚さ

切削抵抗は、切取り厚さに完全な正比例関係にはなく、0.8~1 乗程度に比例する。すなわち、切取り厚さが減少するほど比切削抵抗は増大する。これを切削抵抗の寸法効果といい、その原因には下記の諸項が挙げられる。

- 1) 切取り厚さが減少すると刃先温度が低下し、せん断応力が増大し、摩擦角が増加してせん断角が減少する。
- 2) 切れ刃稜線には多少の丸味や欠けが存在し、切取り厚さがこの丸味などの寸法に近づくと実質すくい角が減少する。
- 3) 切削加工では切り屑を生成するだけでなく、仕上げ面直下に加工変質層を生成するが、

この加工変質層の深さは切取り厚さに比例して減少しないため、切取り厚さが減少するほど加工変質層の生成に要する切削抵抗の割合が増大する。その極限として、切れ刃が上滑りするときには切取り厚さはゼロであっても摩擦力が作用するため、比切削抵抗は無限大になる。

4) 工作物の寸法効果、すなわち材料の寸法が小さくなるほど強度が増大する、という現象がミクロンオーダー以下の微少切削において現れている。

#### 5-2-3 切込みと送り速度

加工能率を主体に考える場合には、切削速度に拘わらずテーブル送り速度 (mm/min) による表示が都合が良いが、加工面精度、刃欠け、切削抵抗などを考える場合には、工具1回転当たりの送り量  $f'$  (mm/rev) または1刃1回転当たりの送り量  $f$  (mm/rev/tool) による表示が望ましく、次のような関係式で表すことができる。

$$f = \frac{C}{N \cdot n} \quad (\text{mm/rev/tool})$$

ただし、 $n$ : 刃数、 $N$ : 回転数 (rpm)

また、切込みと送り速度は切削抵抗に対して次のような影響を与える。

- 1) 切削抵抗の3分力は切込みと送り速度に比例する。
- 2) 送り速度を減少させて切取り厚さを減少させると、前述の寸法効果 (せん断角) によって比切削抵抗が増大する。
- 3) 切込みと送り速度の比が小さくなると、図5-1に示すように切り屑流出角  $\gamma_c$  が増加するため、送り分力  $F_f$  が減少、背分力  $F_p$  が増大する。

また、切り屑の流出方向は同図に示すように切削に与える切れ刃の両端A Bを結ぶ直線に対してほぼ直角方向であることが実験的に明らかにされている。(Colwellの近似)

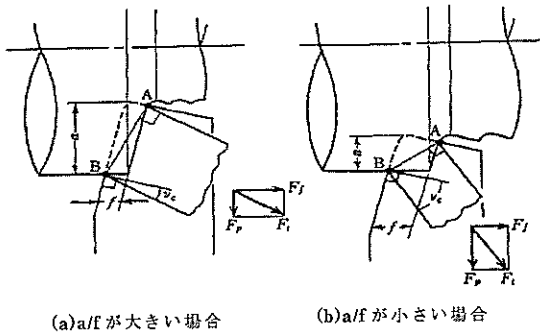


図 5-1 切り屑流出方向および切削力の方向に及ぼす影響

5-3 実験内容

図 5-2 に示すように工作物の端面切削によって実験を行った。切削抵抗を測定し、切削後の形状精度との関連性について評価を行った。

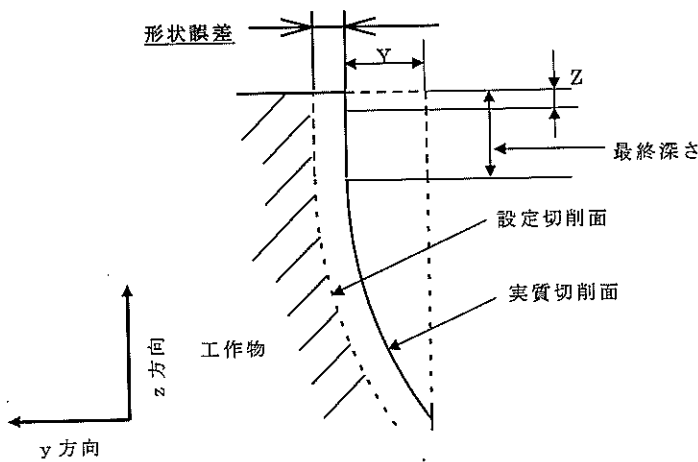


図 5-2 切削実験模式図

5-3-1 切削速度の影響

切削加工において、切削速度は切削抵抗に影響を与える大きな要因の一つである。一般的に、切削速度の上昇によって切削抵抗は減少する。これは、切削速度の上昇とともに切削温度が高くなり、切削点における工作物が局部的に軟化することによるものと言われている。しかしながら、切削速度の上昇は同時にびびり振動も誘発することになる。

このように切削速度が切削加工現象に及ぼす影響は非常に大きく、特に工具突出し量が高い状態での小径エンドミルの加工においてはさらに大きな影響を受けることが予想される。そこで、エンドミルの切削速度が加工特性に及ぼす影響を実験的に検討した。

実験に使用した工具は刃径が 2 mm、首下長さ 20mm の小径ボールエンドミルである。実験方法としては、表 5-1 に示す実験条件のように一刃送りを一定として、送り速度を変化させて切削速度が切削特性にどのような影響を及ぼすかを検討した。

表 5-1 実験条件

回転数   min <sup>-1</sup>		1000,2000,4000,8000 12000,16000,20000
切削速度   m/min		6.28, 12.57, 25.13, 50.24, 75.40, 100.53, 126.57
送り速度   mm/min		60, 120, 240, 480, 720, 960, 1200
一刃送り   mm/tooth		0.03
切込み	Y	0.05
	Z	0.01
首下長さ   mm		20
工作物材質		SUS420J2 相当材(STAVAX,52HRC)
切削方法		ダウンカット
切削方式		ドライ



## 5-3-2 一刃送りと切削速度の影響

切削加工において、一刃当たりの送り速度も切削加工特性に大きな影響を及ぼすことになる。一般に生産現場における仕上げ行程では切込みが非常に浅く、一刃送りを小さくしているが、これは一刃送りを小さくすることによって切り取り量が減少することになり、工作物に作用する切削抵抗を減少させるためである。一刃送りを上げれば加工能率は当然良好になるが、切削抵抗の増大によって、加工精度が著しく低下することが予想される。また、一刃送りを下げれば、切削抵抗が軽減され加工精度は向上するものの加工能率が低下することになる。ここで切削速度を上げれば加工能率は向上する。ただし、そのバランスが悪ければ、加工精度の低下を防ぐことができない。

そこで、一刃送りの影響に加工能率を加味するために、あえて送り速度を一定にして一刃送りと切削速度を変化させて実験を行った。

実験に使用した工具は、前節と同様に刃径が2mm、首下長さ20mmの小径ボールエンドミルである。実験方法としては、表5-2に示す実験条件のように送り速度を一定として一刃送りを変化させたときの切削特性を検討した。

表 5-2 実験条件

回転数 $\text{min}^{-1}$		1000, 2000, 4000, 8000 12000, 16000, 20000
切削速度 $\text{m/min}$		6.28, 12.57, 25.13, 50.24, 75.40, 100.53, 126.57
送り速度 $\text{mm/min}$		480
一刃送り $\text{mm/tooth}$		0.24, 0.12, 0.06, 0.03, 0.02, 0.015, 0.012
切込み	Y	0.05
	Z	0.01
首下長さ $\text{mm}$		20
工作物材質		SUS420J2 相当材(STAVAX, 52HRC)
切削方法		ダウンカット
切削方式		ドライ

## 5-4 実験結果および考察

## 5-4-1 切削速度が切削特性に及ぼす影響

図5-3は、エンドミルの一刃送りを一定として工具送り速度を変化させたときの切削速度と切削抵抗の関係を示したものである。この図から、切削速度が60~80m/min付近までは切削抵抗が増加しているが、それ以降の速度になると逆に切削抵抗は減少していることがわかる。この原因として、次の2つの要因が考えられる。一つは、切削速度が上昇すると首下ロングネックエンドミルにおいては回転挙動が不安定になりやすく、工具たわみ量が増加することになる。そのため、実質切込み量が減少して切削抵抗の減少に繋がったものと考えられる。またもう一つの要因として、エンドミル回転数がある程度高速になると切削熱が高くなり、被削材が軟化して切削抵抗が減少するのではないかと考えられる。

そのときの切削速度と実質切込み比率の関係を図5-4に示している。同図から、切削速度が低速域では切削速度の増加とともに実質切込み比率も増加している。これは、一刃送りが一定であることを考えれば、切削速度を増加させることにより実質切込み量が増加することを表している。しかし、切削抵抗の結果と同様にある程度の切削速度域になると実質切込み比率も減少していることが明らかである。つまり、切削速度が60~80m/minの領域から切削抵抗が減少しているのは切削熱が上昇したことによる被削材の軟化が要因ではなく、回転挙動が不安定になって工具たわみ量が増加したことが主要因になっていることは明らかである。

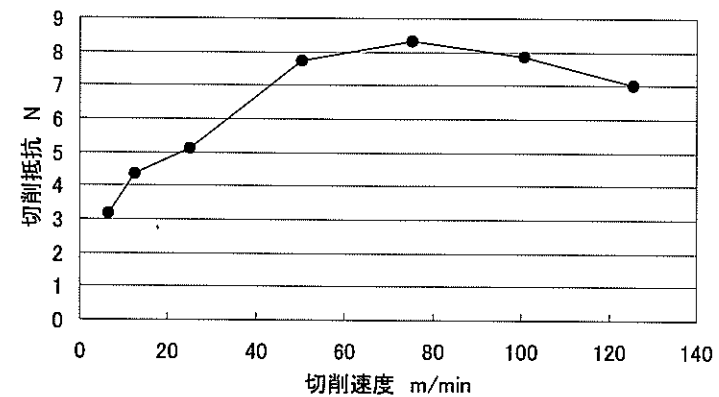


図 5-3 切削速度と切削抵抗の関係

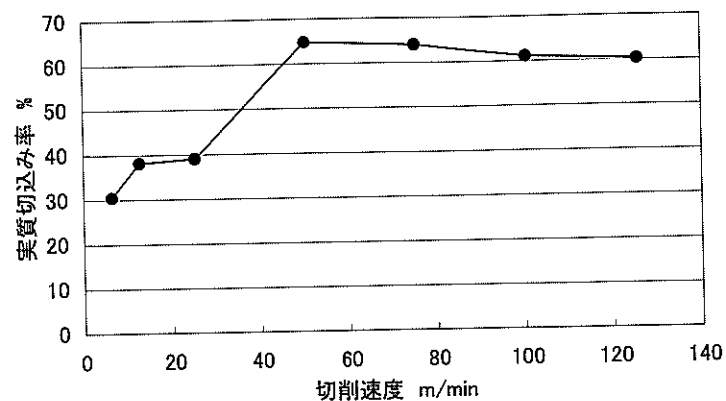


図 5-4 切削速度と実質切込み比率の関係

このような現象を明確にするために、切削速度の低速領域と高速領域において切削抵抗の測定を行い、その切削抵抗波形から、エンドミルの挙動に関する解析を試みた。

図 5-5 は、切削速度違い (6.28m/min, 126.57m/min) の各成分別の切削抵抗波形を示したものである。同図より、切削速度が増大すると切削抵抗の波形より大きなびり振動が発生していることがわかる。このことから、突出し量の長い小径ボールエンドミルを用いて切削加工を行う場合、切削速度を最適な数値で管理しないとびり振動が発生して加工精度を悪化させてしまうことが明らかとなった。

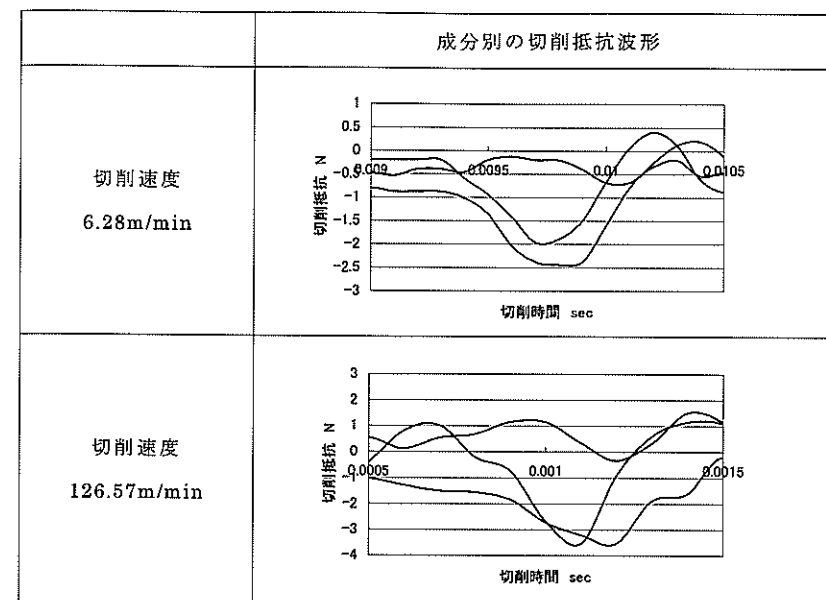


図 5-5 高低域の切削速度における成分別切削抵抗

#### 5.4.2 一刃送りと切削速度の関連性

図 5-6 は、工具送り速度を一定としたときの一刃送りと切削抵抗の関係を示したものである。同図より、エンドミル一刃送りが増加すると切削抵抗も増加しているのがわかる。この原因として、エンドミルの一刃送りが増加すると一刃あたりの切り取り量が増加するために切削抵抗も増加したものと考えられる。

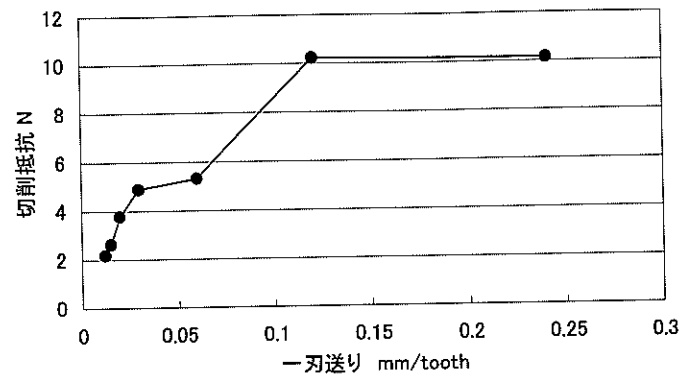


図 5-6 一刃送りと切削抵抗の関係

また、図 5-7 は一刃送りと実質切込み率の関係を示したものである。同図より、一刃送りを増加させると実質切込み率が減少していることがわかる。これは、一刃送りが増加するために切削抵抗が増大することによって形状誤差を生じ、それに伴って実質切込み率が減少したことに起因するものと考えられる。

ここで、図 5-6 において一刃送りを  $0.12 \text{ mm/tooth}$  から  $0.24 \text{ mm/tooth}$  に変化させた場合切削抵抗はほとんど一定値をとっていることがわかる。本来であれば、実質切込み率が減少していることから切削抵抗は下がるものと考えられるが、切削速度が低くなっていることにより、その傾向に相違を生じたものである。

これらのことから、基本的には一刃送りを大きくすると切り取り量は増加するが、実質切込み率は減少することになり、加工精度が低下すると言える。

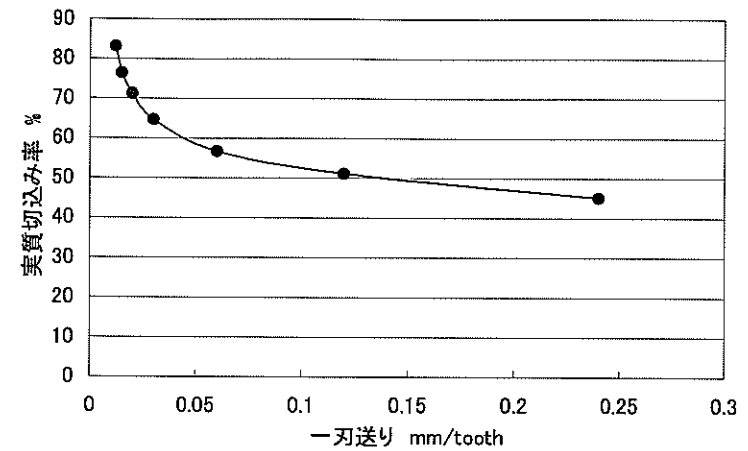


図 5-7 一刃送りと実質切込み率の関係

### 5-5 結言

本章では、首下長さを固定し、工作物材質に前章と同様の STAVAX (SUS420 J2 相当材) を採用し、切削加工条件を変化させて切削特性を実験的に検討した。通常、条件的に切削速度が上昇すると一定領域までは工具刃先の切削熱が上昇するために切削抵抗は増大することが知られている。本章で行った実験結果からもその傾向は現れているが、切削速度が  $60 \text{ m/min}$  近辺から切削抵抗は減少している。これは、実質切込み比率が同様に  $60 \text{ m/min}$  近辺から減少していることより、切削熱によって被削材が軟化することにより起因するものではなく、エンドミルの回転挙動が不安定になり、たわみ量が増大したことによるものである。つまり、本研究のような小径ボールエンドミルを用いた深彫り切削においては、切削速度の設定が極めて重要であり、 $60 \sim 80 \text{ m/min}$  の切削加工条件を提案する。

また、実際の生産現場の要望を考えれば、一刃送り量をあまり少なくすると加工時間が長くなり、高能率加工という課題を解決することができなくなる。そこで次章では、深彫り切削に対しても一刃送りを通常よりも大きく設定し、課題解決のための検討を実施する。

## 参考文献

- 1)高橋一郎,安齋正博:精密工学会誌,第65巻第6号,(1999)867.
- 2)大谷敏昭,藤瀬健傾:精密工学会誌,第54巻第10号,(1988)1969.
- 3)関谷克彦,山根八洲男:2001年精密工学会秋季大会講演論文集,(2001)356.
- 4)松村隆,村山孝博:精密工学会誌,第65巻第11号,(1999)1617.
- 5)中山一雄 他:機械加工 朝倉書店 1997

## 第6章 工具たわみの要因とその評価

## 6-1 緒言

前章においても述べたが、小径ボールエンドミルを用いた加工では加工精度を左右する要因を十分把握することが極めて重要である。その中でも、大きな要因として考えられるエンドミルの突出し量についての影響を実験的に検討してきた。しかしながら、加工精度を悪化させる要因、すなわち工具たわみ量を発生させる要因としては様々な事が考えられる。

そこで本章では、工具突出し量を一定にし、工具母材である超硬合金の組成を変化させ、さらに工具へのコーティング皮膜の材質を変えた小径ボールエンドミルを試作し、その工具剛性の影響を把握するために首形状が加工精度に及ぼす影響についての検討を行った。特に、工具母材とコーティング薄膜が工具たわみ量に与える影響について切削時の切削抵抗を測定し、理論的な工具たわみ量と切削時における工具たわみ量を比較、検討した。その中で、エンドミル切れ刃にどのような切削力が掛かっているのか、その結果加工物表面がどのような性状になるのか、工具のたわみを引き起こす要因を実験的に検討し、深彫り切削加工に対する小径ボールエンドミルの支配因子を明らかにし、最適な工具仕様の検討を行うものである。

## 6-2 実験内容

前章までは、首下長さおよび切削条件の影響などの基本的な切削特性について明らかにしてきた。本章では、より具体的な切削現象を把握するため、工具刃径、首下長さおよび切削条件を前章の結果を踏まえて固定して切削実験を行った。また実験に使用した工作機械はより高速での安定性を重視するために、増速スピンドルを使用せずに高速回転に対応したマシニングセンタを採用した。さらに、小径ボールエンドミルを用いた切削加工において定量的に実験を行うには工具摩耗の把握が大変重要な因子となる。そこで、工具摩耗の進行にともなう加工精度の変化に関しても実験的に検討を行った。

## 6-2-1 実験装置および実験方法

小径ボールエンドミルを用いた切削加工においては工作機械主軸の高速回転が必要不可欠であり、より安定した切削環境で評価を行うために高速主軸を要するマシニングセンタ（㈱牧野フライス製作所 V33）を使用した。また、被削材質として前章で採用したものと同様のプラスチック金型用鋼に広く用いられている焼入れ焼戻し鋼 SUS420J2 相当材（STAVAX、HRC52）を用いた。図 6-1 は、本章で用いたマシニングセンタの外観図を示したものである。



図 6-1 マシニングセンタの外観図

また、本章において用いた被削材の加工面には、実質切込み比率をより正確に検討するため、図 6-2 に示すように基準面として加工前にあらかじめ  $1^\circ$  のテーパを設けている。この被削材をテーブル上に固定し、小径ボールエンドミルをマシニングセンタの主軸に装着して、工具剛性、すなわち工具母材のヤング率の影響が最も顕著に現れるように立ち壁に近い勾配面の切削加工を等高線方式で上面から下面に向かって行った。そのときの加工段差、切削抵抗、加工面の表面粗さおよび実質切込み比率を測定した。

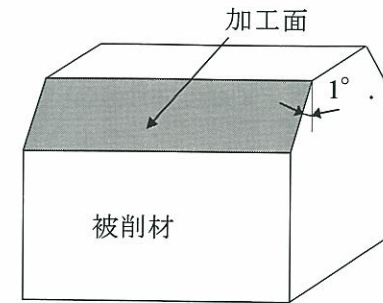


図 6-2 テスト加工形状

なお、本章では工具摩耗が切削特性に及ぼす影響について検討するため、小径ボールエンドミルを順次所定の切削距離に到達するまで連続して切削加工を行い、所定の切削距離に到達した時点において前述の切削特性を測定する方法を採用した。

ここで、実質切込み比率とは前章において述べたように設定切込み量に対する実質切込み量の比率を表したもので、この値が 100% に近いほど加工誤差が小さいことになる。ただ、工具摩耗が切削特性に及ぼす影響について検討する中で、工具摩耗の進行に伴って工具径方向に工具が減衰することになり、切削初期に比べて工具径が減少するという現象を生じる。一般的に工具摩耗とは逃げ面方向に後退することを表しているが、機械的摩耗が進行するとすくい面方向にも擦られながら切削が行われるため、工具刃径が小さくなる。本研究ではこの工具刃径方向に進行する摩耗を工具摩滅と定義する。すなわち、実質切込み比率にはこの工具摩滅の影響が含まれるため、工具たわみ量の検討を行う際には、工具摩滅量を考慮することが必要となる。

この工具摩滅量を把握するには切削加工後において工具径を測定することになるが、通常のエンドミルには工具径のばらつきが存在するためにその信頼性に欠けるという問題がある。そこで本研究では、切削加工前の工具径をあらかじめ測定してその値を基準値として定義した。また、その際の測定ポイントとしては図 6-3 に示すように切削加工時に被削材の加工面に接触する切れ刃位置で測定し、切削加工後に再度測定を行い、その差異を計算することによって工具摩滅量を算出した。これによって、前述の工具径のばらつきを排除することができる。

ができる。本研究では、この値を工具たわみ量として評価した。

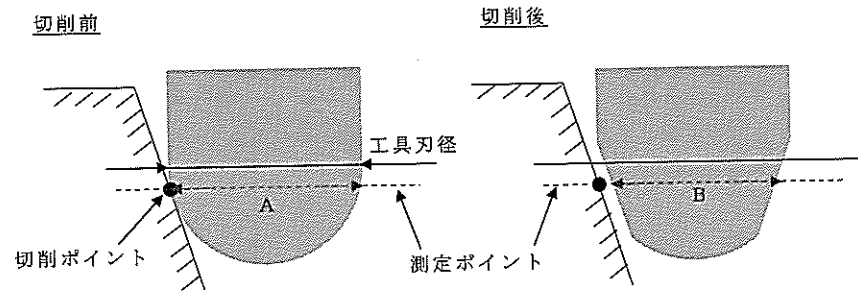


図 6-3 工具摩滅量の測定

また本実験においては、設定切込み量と実質切込み量との差異を正確に測定するために、図 6-4 に示すように切削距離ごとに基準面である  $1^\circ$  の勾配面と設定切込みを与えて切削加工を行った加工面との加工段差を顕微鏡で測定し、その値を実質切込み量とした。

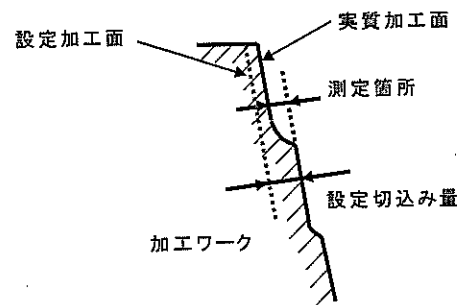


図 6-4 実質切込み量の測定方法

上述したが、工具は切削距離の進行とともに摩耗し、工具摩滅が発生するため、測定した加工段差には、図 6-5 に示すように工具たわみ量と工具摩滅量が含まれた値となる。そこで、設定切込み量と測定した実質切込み量の差異に対して工具摩滅量を考慮しなければならない。つまり、実際の工具たわみ量として次式で表される計算式により算出すること

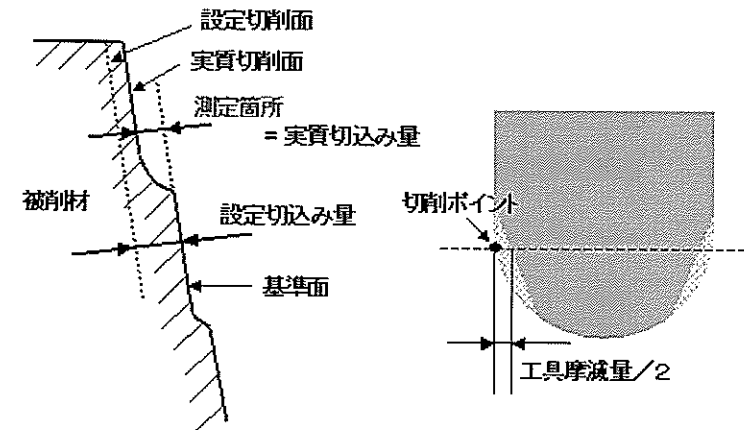


図 6-5 工具たわみ量の定義

$$\text{工具たわみ量} = (\text{設定切込み量} - \text{実質切込み量}) - \frac{\text{工具摩滅量}}{2} \quad \dots (6.1)$$

また本章で使用した小径ボールエンドミルの仕様を表 6-1 に示す。さらに、実験条件は表 6-2 に示すように設定した。このように基本的な工具緒元と切削条件を固定することによって、それぞれの要素が切削加工中に切削特性に対してどのように影響を及ぼすかを定量的に調査した。

エンドミルの切れ刃は、切削加工を繰り返すことによって摩耗が漸次進展する。工具摩耗には工具切れ刃の初期摩耗による不規則摩耗や定常摩耗による刃先の安定した摩耗など様々な形態があるため、切削初期と切削距離 100m および 400m において切削実験を行った。これによって工具摩耗および工具摩滅の進展具合により、切削特性の影響を系統的に把握することが可能になる。

表 6-1 供試小径エンドミルの仕様

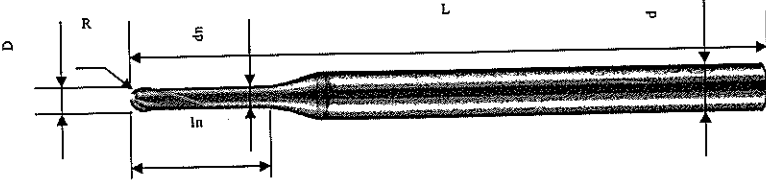
	
刃先 R mm	1
刃径 D mm	2
首下長さ l_n mm	10
刃長 l mm	1.7
首径 d_n mm	1.92
シャンク径 d mm	4
全長 L mm	50

表 6-2 切削条件

回転数 min <sup>-1</sup>		10000
切削速度 m/min		63
送り速度 mm/min		1400
一刃送り mm/tooth		0.07
切込み量	Y方向 mm	0.1
	Z方向 mm	0.1
切削長 m		0, 100, 400
被削材		STAVAX (52HRC)
切削方式		Down Cut, Dry Cut

また切削距離ごとの切削抵抗の測定には、3成分動力計(KISTLER 9257B)を用いた。ここで、図 6-6 に示すように工具のたわみ方向に最も影響をおよぼす Y 方向成分(背分力)の評価を行った。

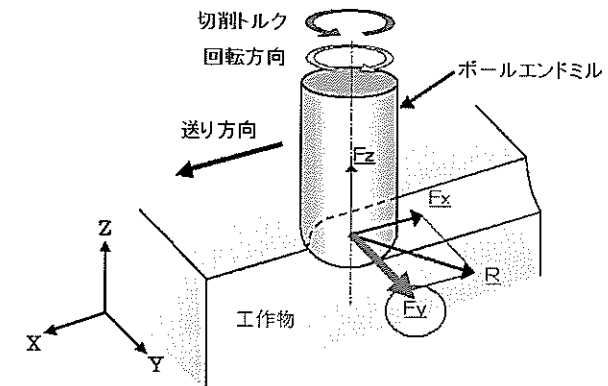


図 6-6 エンドミルに作用する切削力の各成分

この Y 方向成分の切削抵抗から理論的な工具たわみ量  $\sigma$  を算出するために次式のはりのたわみ式を用いた。ここで、エンドミルの刃部を円筒形状として近似し、首下部分の等価直径を用いた。

$$\sigma = \frac{PL^3}{3EI} \left( I = \frac{\pi d^4}{64} \right) \dots (6-2)$$

E: ヤング率 P: 切削抵抗(背分力) L: 首下長さ

I: 断面 2 次モーメント d: 等価直径



## 6.2.2 工具母材材質

前章においても述べたように、小径エンドミルを用いて切削加工を行う場合、工具たわみ量が切削特性に対して大きな影響を及ぼすことになる。その工具たわみ量は、はりのたわみの式からもわかるように理論的には工具そのものが持つヤング率の影響を受けることは明らかであり、工具母材材質の変化によって、切削特性は必然的に変わることが予測できる。そこで本実験においては、3種類の異なる超硬母材を用いて任意の形状の小径ボールエンドミルを製作した。ここで、小径ボールエンドミルによる深彫り切削において超硬母材の粒径が細かすぎるとチップングを引き起こすことは前章でも述べたとおりである。実際に工具刃先にチップングや欠損が発生すると加工面精度に悪影響を与えるため、粒径サイズは微粒子超硬合金の標準サイズである $0.6\mu\text{m}$ のものを採用した。

表 6-3 は、本実験において使用した超硬母材の組成および代表的な物性値をまとめたものである。一般的に Co がバインダーの役割をしており、その量の大小によって超硬母材の物性値は異なったものになることは明らかである。バインダーの Co 量が減少すると超硬母材の硬さは高くなるが、その一方で靱性は低下する傾向を示している。本実験においては Co 量が 8、10、13.5% の異なる超硬母材を使用している。

図 6-7 に本実験に使用した Co 量 8% の超硬母材の代表的な組織写真を示しているが、異常な粒成長はなく均一な組織になっていることがわかる。

表 6-3 供試超硬母材の組成と物性値

超硬母材	組成			物性値			
	WC	Co	TaC	硬さ HRA	比重 $\text{g/cm}^3$	抗磁力 Oe	抗折力 GPa
A	Bal	8%	0.25%	93.4	14.45	380	4.1
B	Bal	10%	0.5%	93.0	14.25	360	4.1
C	Bal	13.5%	0.5%	91.8	14.00	330	3.9

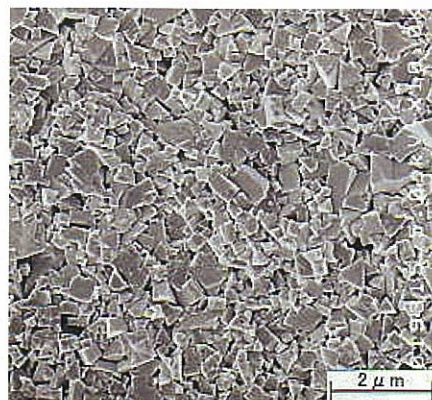


図 6-7 超硬母材の組織 (Co8%)

## 6.2.3 コーティング薄膜材質

近年、エンドミルを用いた切削加工におけるコーティング薄膜の役割はますます重要なものとなっており、それによって工具寿命は飛躍的に向上している。また、切削工具の中心的母材は、超硬合金が主流になってきており、高速度鋼に比べると硬くてもろい材料であると言える。したがって、PVD法によってコーティングする場合に最も気をつけなければならないことは、皮膜の密着性が高いことはもちろんであるが、コーティング後に工具強度をなるべく低下させないように皮膜材料、膜厚、残留応力などをコントロールする必要がある、このような問題に対する研究は多くなされている<sup>2)3)4)</sup>。しかしながら、コーティングによってエンドミルの機械特性がどのように変化し、切削挙動にどのような影響を及ぼすかなどについて具体的に研究した事例はほとんど見当たらない。

そこで、本研究では従来より広く用いられている TiAlN 系のコーティング薄膜の特性とは大きく異なり、ナノ結晶構造を有する CrSiN 系と TiSiN 系の 2 種類のコーティング薄膜を施した小径ボールエンドミルを用いて、定量的な実験を行った<sup>5)</sup>。

表 6-4 は、前述の 3 種類のコーティング薄膜諸特性を示したものである。ここで、表中の臨界荷重は、スクラッチ試験より得られる値であり、ダイヤモンド圧子に荷重を連続的に付与しながらコーティング薄膜表面上を移動した際、スクラッチ痕に剥離が発生し始め



る荷重値である。また、摩擦係数は、ボールオンディスク型摩耗試験によりSKD11製のボールにコーティング薄膜を被覆し、S50C製のディスク材上に一定の荷重を付与し、ディスク材を回転させながら一定距離を摺動させて求めた摩擦係数である。さらに、耐酸化性は、酸化層の厚さが皮膜最表面から0.5 $\mu$ mまで達する温度を示したものである。また、被膜硬度に関しては、鏡面研磨を施した測定面に対して垂直方向より測定したものである。

同表からもわかるように、CrSiN系のコーティング薄膜は他の材質に比べて溶着性や潤滑性に優れた特性を示している。また、TiSiN系コーティング薄膜は従来からのTiAlN系やTiN系およびCrSiN系コーティングに比べて硬さが向上しており、高い耐熱温度の特性を持っている。すなわち、本実験に使用した被削材の切削に対して工具摩耗を抑制することが期待できる。

表 6-4 各コーティング薄膜の諸特性

コーティング薄膜の種類	TiAlN系	CrSiN系	TiSiN系
特性	高硬度, 耐酸化性	低摩擦, Fe と の親和性	高硬度, 耐酸化性
硬度 GPa	41	38	56
臨界荷重 N	100	100	100
酸化温度 $^{\circ}$ C	800	1000	1100
摩擦係数	0.8	0.3	0.9

前記でも示したとおり、本実験に使用したCrSiN系薄膜とTiSiN系薄膜はナノ結晶構造を有している。図6-8は透過型電子顕微鏡(TEM)によるTiSiN系コーティング薄膜の結晶構造観察の結果を示したものである。同図から、電子解析の結果、ナノ結晶粒1はfcc構造からなり、粒間2は非晶質構造であることがわかり、非晶質組織にナノ結晶粒を分散させることにより高硬度化を達成している。すなわち、酸化の進行を抑制することができ、耐酸化性を大幅に改善したコーティング薄膜である<sup>8)</sup>。

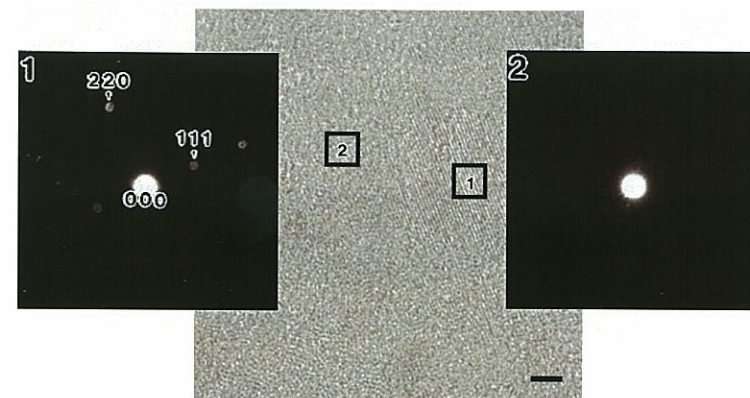


図 6-8 ナノ結晶構造

#### 6-2-4 エンドミルの首形状

小径ボールエンドミルを用いて深彫り加工を行う場合、剛性は最も重要な因子となる。とくに、工具断面積は加工精度に大きな影響を及ぼすことが容易に予測できる<sup>7)</sup>。しかしながら、工具摩耗が進行したときのエンドミル首形状の影響を明確に示した研究はほとんど見当たらない。

そこで、首形状の異なる小径ボールエンドミルを試作して前章と同様の切削実験を行い、工具摩耗が切削特性に及ぼす影響について検討した。図6-9は、本章において用いるエンドミルの首形状を示したものである。

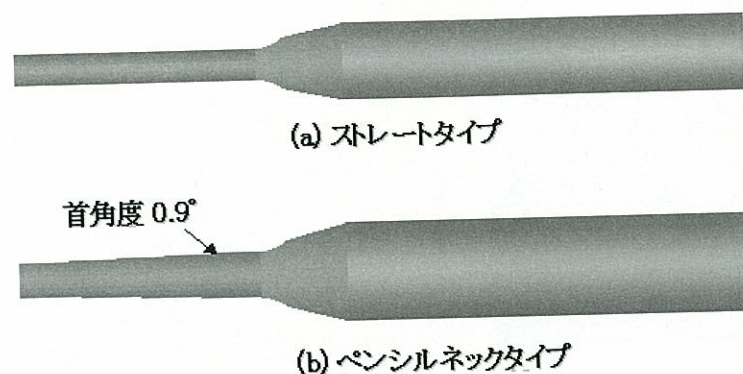


図 6-9 エンドミルの首形状の種類

エンドミルの工具断面積は、はりのたわみ式からもわかるように工具たわみ量に大きな影響を及ぼす因子であることは言うまでもない。図 6-10 は、エンドミルの両首形状における変位量と折損荷重の関係を示したものである。同図より、静荷重試験において 2 種類の首形状における断面積の影響がはっきりと確認できる。この試験方法としては、前章で行った方法と同様でまず工作物に穴を設け、その中に試験用試料を工作物表面から 0.2 mm の深さまで入れ、その状態で試験用試料を回転させずに送り速度 2 mm/min で工作物に接触させ、その時に発生する切削抵抗を 3 分力動力計で測定した。それから得られる電圧変化をアナログデータロガーによって同一の時間軸で測定、記録した。この測定は、試験用試料が折れるまで切削抵抗の計測を続行した。ここで、試験に使用した試料形状は刃部寸法が  $\phi 0.95$  mm、首下長さが 12 mm で図 6-9 に示したようなストレートタイプとペンシルネックタイプの 2 種類である。

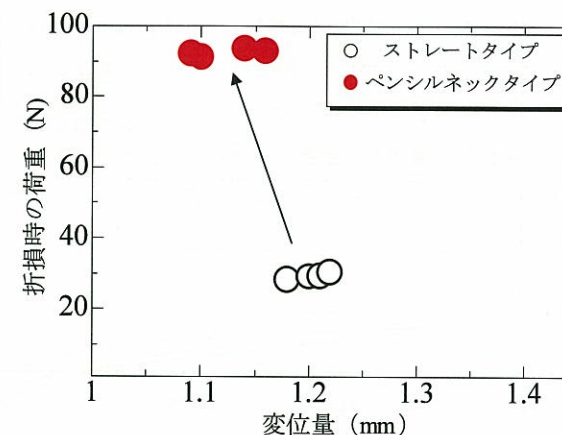


図 6-10 変位量と耐加重の関係

### 6-3 実験結果および考察

#### 6-3-1 工具母材材質が工具たわみに及ぼす影響

工具母材の C o 含有量を 8, 10, 13.5% と変化させた 3 種類の小径ボールエンドミルを用いて、工具摩耗が切削特性に及ぼす影響を切削抵抗、実質切込み比率および工具たわみ量の観点から考察した。なお、切削実験に使用した小径ボールエンドミルには CrSiN 系コーティング薄膜が施されており、耐溶着性および潤滑性に対して改善がされたものである。超硬合金のヤング率は、その粒径の大小よりも C o 含有量に大きな影響を受けることが知られており<sup>10)</sup>、ここで採用した粒径 0.6  $\mu$ m の超硬合金のヤング率は図 6-11 のように表すことができる。同図より、C o 含有量が増加するにしたがってヤング率が低下、すなわち工具の靱性が向上すると言える。また図中に示す実験式が成立することがわかる。

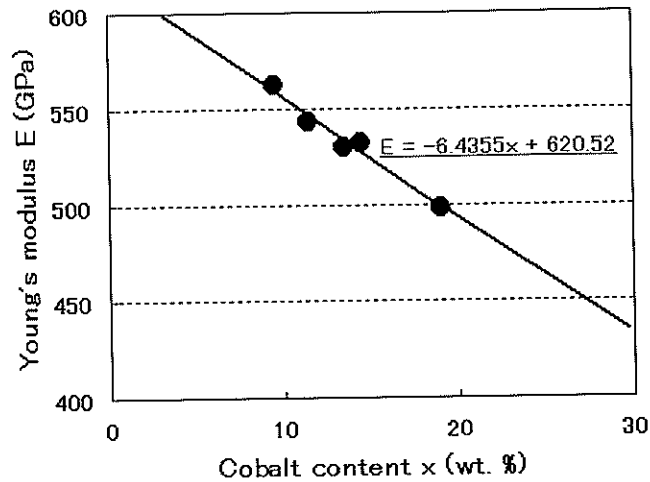


図 6-11 Co含有量とヤング率の関係

この実験式より算出したヤング率と超硬母材の硬さとの関係を示すと図 6-12 のようになる。この図からもわかるように、超硬母材の硬さとヤング率の間には基本的に比例関係があり、超硬母材が硬くなるとヤング率が高くなり、工具たわみ量を抑制することが可能となる。

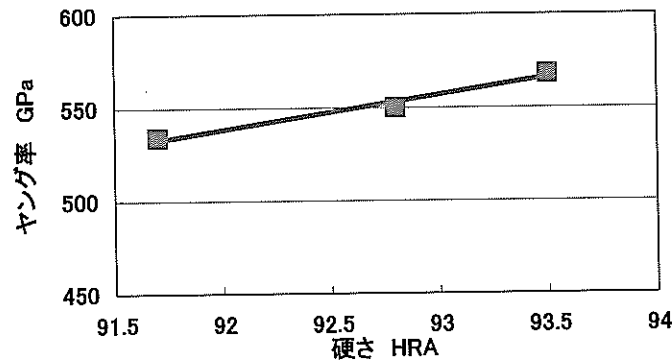


図 6-12 硬さとヤング率の関係

図 6-13 は、Co含有量の異なる小径ボールエンドミルに対する切削距離と切削抵抗の関係を示したものである。この図より、切削抵抗は切削距離の増加に伴ってほぼ比例的に増大していることがわかる。これは、切削距離の増加に伴って小径ボールエンドミル切れ刃の摩耗が進展し、被削材への切れ刃の食い付きが悪くなり、切削抵抗、とくにY方向分力が増加した結果によるものと考えられる。しかしながら、小径ボールエンドミルのCo含有量による差異はほとんど見受けられず、定性的に同様の傾向を呈していることから、切削抵抗に対する工具母材のCo含有量の影響は少ないものと思われる。

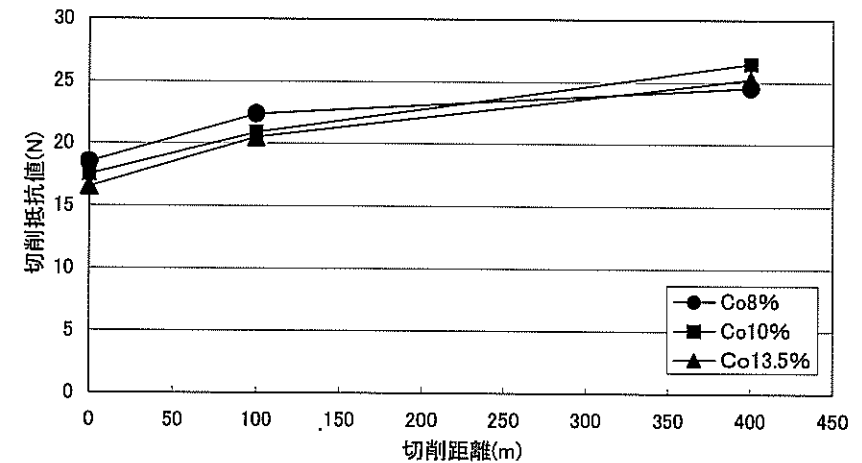


図 6-13 切削距離と切削抵抗の関係

ここで、切削距離が増大すると工具摩耗が進行することから、加工誤差には工具たわみ量と工具摩耗による工具刃径の減少が含まれることになる。そこで、前述したように加工誤差から工具摩耗量を除去して実際の工具たわみ量を算出した。その結果を図 6-14 に示す。同図より、切削距離の増大にともなって工具たわみ量は増加する傾向にあることが確認できる。これは、工具摩耗の進行に伴って切削抵抗が増大したことが主要要因と考えられる。しかしながら、超硬母材のヤング率の相違による工具たわみ量の差異は小さく、Co含有量を変化させただけでは工具たわみ量を抑制する効果は小さいことがわかる。

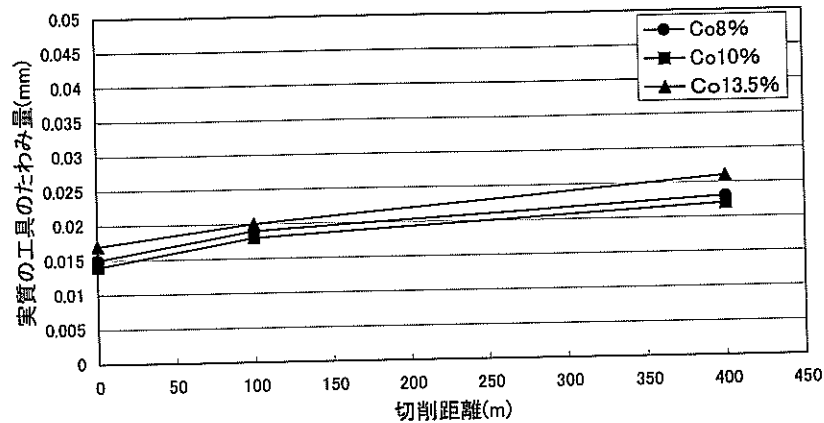


図 6-14 切削距離と実質工具たわみ量の関係

また、切削抵抗の測定結果から、はりのたわみ式に代入して理論工具たわみ量を算出することにより、実際の工具たわみ量との比較を行った。その結果を図 6-15 に示す。同図から、工具摩滅量を考慮した工具たわみ量の実測値は理論たわみ量と傾向がほぼ一致していることが確認できる。

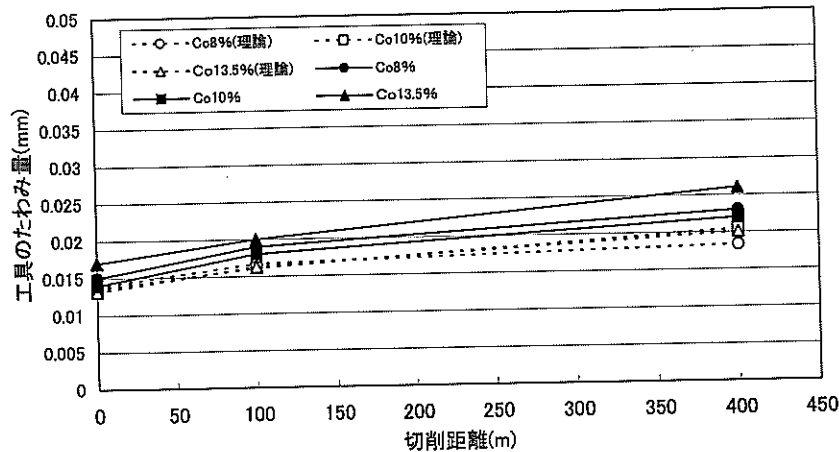


図 6-15 工具のたわみ量の比較解析結果

図 6-16 は、超硬母材の Co 含有量を変化させた場合の切削距離と実質切込み比率の関係を示したものである。同図から、切削距離の増加に伴って実質切込み比率は大きく減少する傾向が見られ、工具摩滅量の増加にほぼ反比例するように減少していることがわかる。これらの現象は、工具摩滅の進行に伴って切削抵抗、すなわち工具に掛かる Y 方向分力が増大することによって工具たわみ量が増加したことによるものと考えられる。とくに、Co 含有量 13.5% の小径ボールエンドミルにおける実質切込み比率は極端に低下していることが明らかである。それぞれに掛かる切削抵抗はほぼ同等であり、工具たわみ量としてもほとんど差異がないことから、工具摩滅による刃径方向への工具摩滅量が大きな影響を及ぼしているものと推察される。

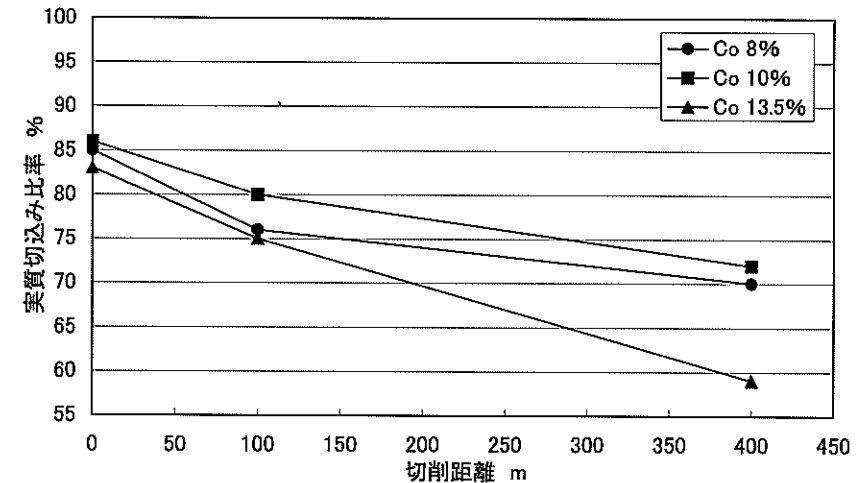


図 6-16 切削距離と実質切込み比率の関係

図 6-17 には、切削距離と逃げ面摩滅幅との関係を示す。同図からもわかるように、切削距離の増大とともに逃げ面摩滅幅は増加しているが、とくに Co 含有量 13.5% の小径ボールエンドミルが切削距離の増大とともに急激に摩滅していることがわかる。この原因の一つとしては、Co 含有量が増加したことにより、耐摩耗性が低下したことである。さらに、超硬母材の物性値である抗磁力が低下したことにより切削距離の増加に伴って刃先に連続的な脱落摩滅を発生したことが考えられる。



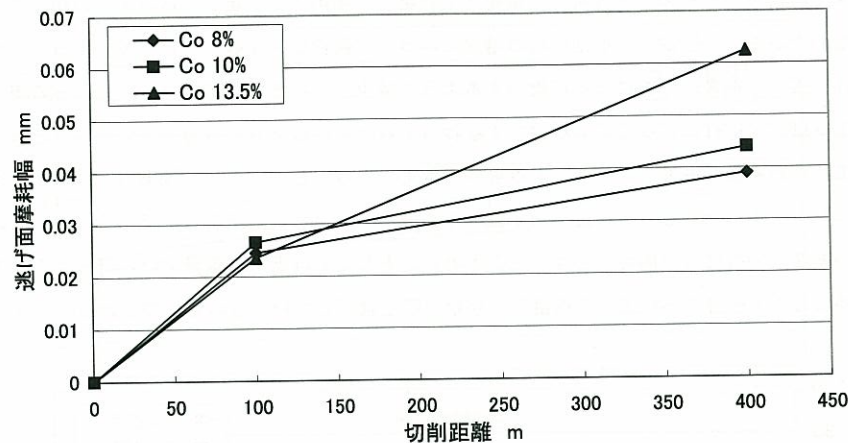


図 6-17 切削距離と逃げ面摩耗幅の関係

また、図 6-18 には、Co 含有量の異なるエンドミル切れ刃の摩耗状態の比較を示しているが、切削距離 400 m における摩耗幅を比較すると Co 含有量 13.5% が明らかに大きく摩耗していることが認められる。それに対して、Co 含有量が 8% および 10% のものは摩耗幅が小さいことから、Co 含有量を最適化することによって摩耗幅をある程度抑制することが可能であると言える。

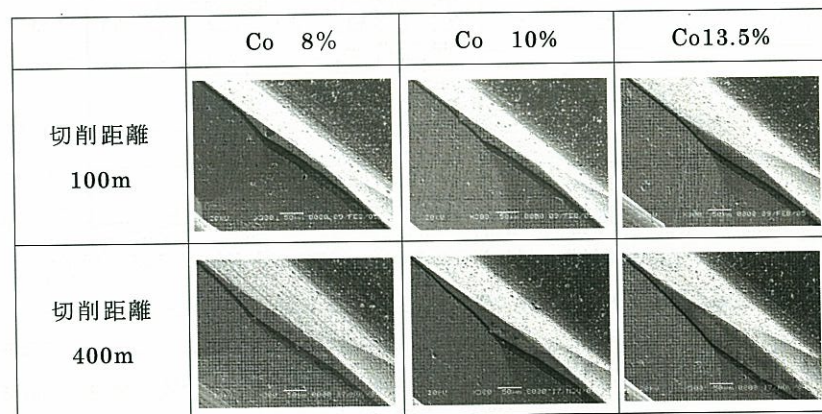


図 6-18 摩耗状態の比較

これは、前述の実質切込み比率の関係からも明かなように、加工誤差が工具摩耗に大きく依存していることを表している。すなわち、小径ボールエンドミルを用いた深彫り加工において工具母材の材質が与える影響は工具たわみ量を抑制するのではなく、工具摩滅量を抑制することにより、加工誤差を発生する要因を抑える効果があることが明白となった。

### 6.3.2 コーティング薄膜材質が工具たわみ量に及ぼす影響

コーティング薄膜材質を CrSiN 系および TiSiN 系とした小径ボールエンドミルにおいて、工具摩耗が切削特性に及ぼす影響を切削抵抗、実質切込み比率および工具のたわみ量の観点から考察した。なお、本実験に使用した小径ボールエンドミルは Co 含有量 8% の超硬母材のものである。

前述したように、CrSiN 系のコーティング薄膜と TiSiN 系のコーティング薄膜では膜の特性が全く異なっている。

図 6-19 は TiAlN 系コーティング薄膜と CrSiN 系コーティング薄膜の摩擦係数を比較したものである。これは、ボールオンディスク型摩耗試験機を用いて測定した結果であり、CrSiN 系コーティング薄膜の膜表面には鉄系の付着物がほとんど観察されないことがわかる。同図からも、CrSiN 系コーティング薄膜は切削中における切りくずの溶着による仕上面の劣化を抑制する効果が期待できる。

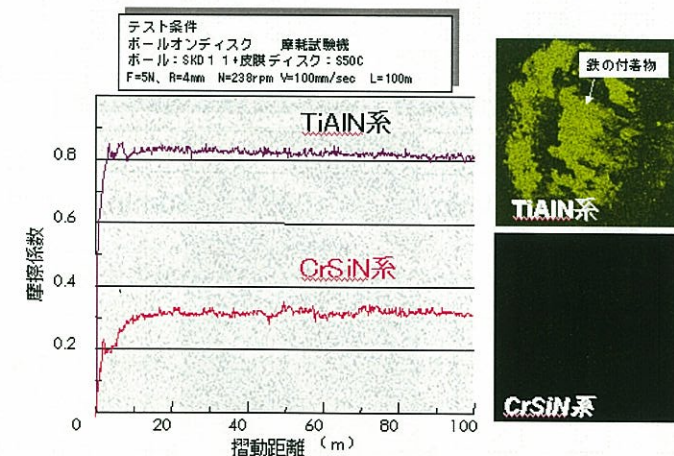


図 6-19 コーティング薄膜の違いによる摩擦係数の関係



また、図 6-20 はTiAlN系コーティング薄膜とTiSiN系コーティング薄膜の耐酸化性について比較したものを示している。これは、高温化において長時間放置した際のそれぞれの皮膜内部状態についての観察を行ったものである。同図からもわかるように、TiAlN系コーティング薄膜は皮膜内部で酸化が進行してポーラス状の酸化膜が形成されているのに対し、TiSiN系コーティング薄膜では皮膜内部の酸化はほとんど確認されない。また、TiSiN系コーティング薄膜は硬度が大幅に向上しており、上述の耐酸化性を考慮すると切削中における工具摩耗をかなり抑える効果が期待できる。

これら全く異なった特性を持つコーティング薄膜を小径ボールエンドミルに施すことで、切削中の機械的特性がどのような影響を及ぼすかを実験的に検討した結果について以下に述べる。

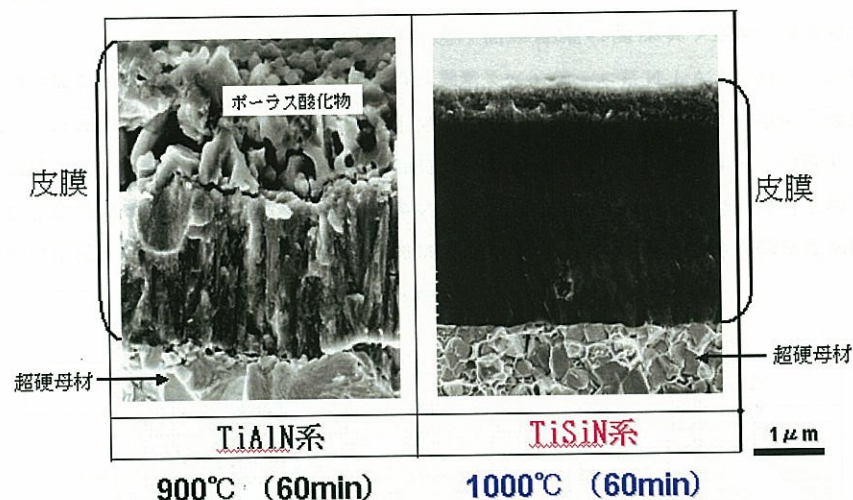


図 6-20 コーティング薄膜の違いによる耐酸化性の違い

本実験に採用した被削材は、焼入れ焼戻し鋼SUS420J2相当材（STAVAX、HRC52）であることから、TiSiN系コーティング薄膜はTiAlN系やCrSiN系のコーティング薄膜に比べて皮膜硬度が高いため、切削中の工具摩耗を十分に抑制することが期待できる。

図 6-21 は切削距離と工具摩耗幅との関係をTiSiN系コーティング薄膜とCrSiN系コーティング薄膜について比較したものである。同図から、TiSiN系のコーティング薄膜はCrSiN系コーティング薄膜に比べて逃げ面摩耗幅がかなり抑制されていることがわかる。これは、前述のように、TiSiN系コーティング薄膜は切削中に発生する熱影響を受けにくいために工具摩耗が抑制された結果である。

図 6-22 には、切削後のそれぞれの摩耗状態を示しているが、同図からもTiSiN系のコーティング薄膜は皮膜の劣化が少ないことが明らかである。

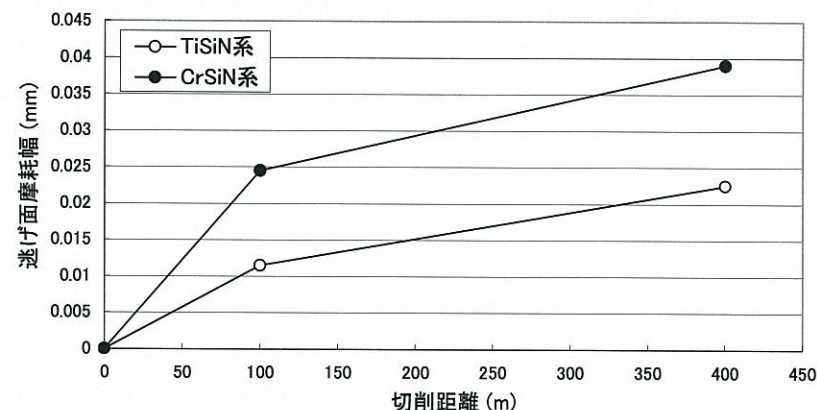


図 6-21 切削距離と逃げ面摩耗幅の関係

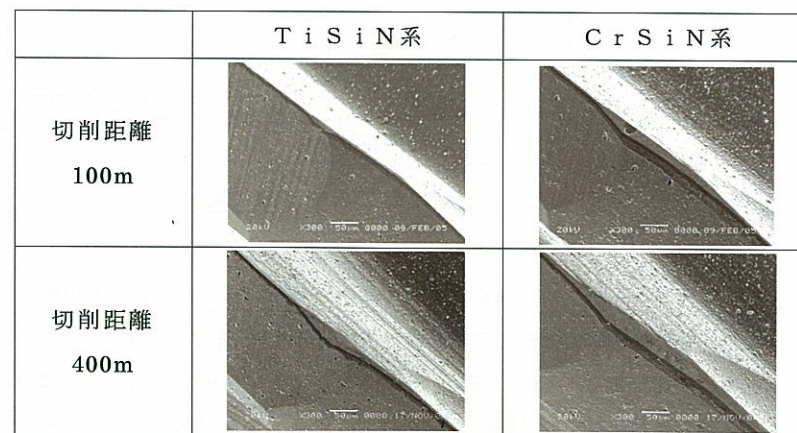


図 6-22 摩耗状態の比較

ここで、加工誤差の支配的要因は、すでに述べたように逃げ面方向の工具摩耗量ではなく、工具刃径方向の減少量、すなわち工具摩減量である。通常は工具の逃げ面摩耗量によって工具摩減量が理論的に求められるが、小径ボールエンドミルによる深彫り加工においては切削挙動が不安定、かつ工具たわみを生じながら切削加工が行われるため、逃げ面が必要以上にこすられて摩耗を促進する。そのために、測定した工具摩耗幅から工具摩減量を算出することは困難となる。そこで、前述のように工具摩減量の測定は切削ポイントにおける切削前後の工具径を測定し、その差によって算出した。図 6-23 は、両コーティング薄膜における切削距離と工具摩減量との関係を示したものである。同図より、切削距離の増大に伴って工具摩減量は増加していることがわかる。しかしながら、コーティング薄膜による明確な差異は現れていない。これは、コーティング薄膜の特性の相違によって逃げ面摩耗幅に影響を及ぼしても、刃径方向への工具摩減量で考えると、工具母材の影響の方が大きく現れて結果的に明確な差異を生じなかったものと思われる。

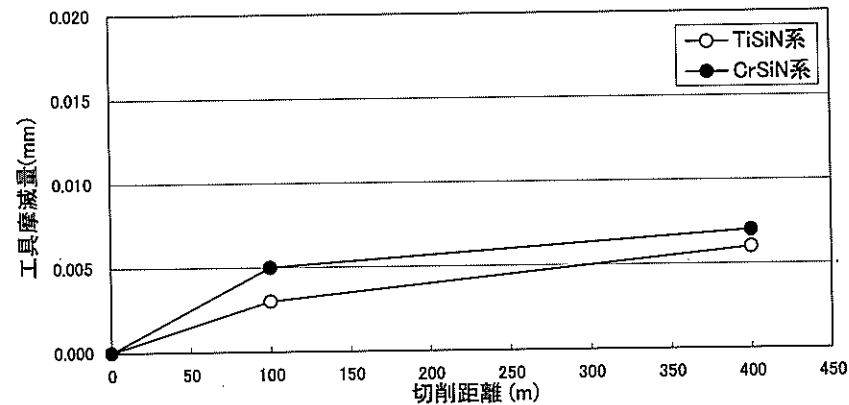


図 6-23 切削距離と工具摩減量の関係

また、図 6-24 は両コーティング薄膜に対して切削距離と実質切込み比率との関係と比較したものを示している。本実験に使用した超硬母材はともに Co 含有量 8% であり、超硬母材のヤング率は同等である。さらに、図 6-23 に示したように切削後の工具摩減量がほぼ同等であることから、加工誤差はコーティング薄膜の相違によってほとんど変わらないはずである。しかしながら、同図の結果からコーティング薄膜の相違によって実質切込み比率

に明らかな差異を生じていることがわかる。すなわち、TiSiN系コーティング薄膜は切削距離の増大にともなう加工誤差の劣化がかなり抑制されていることが明らかである。

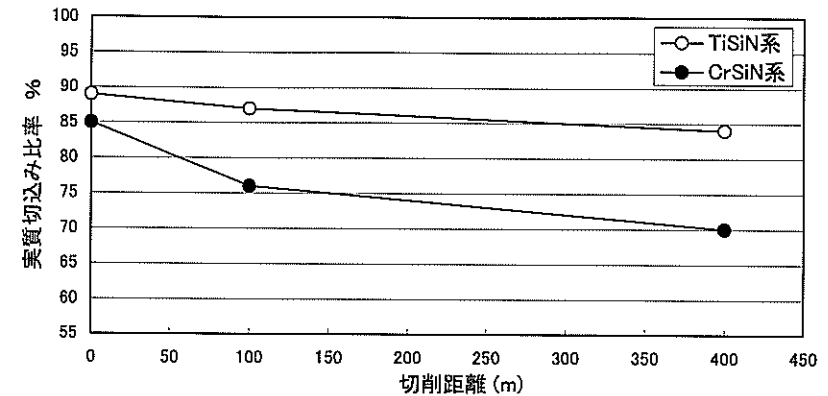


図 6-24 切削距離と実質切込み比率の関係

そこで、切削抵抗の測定を行って工具の理論たわみ量を算出した。さらに、両コーティング薄膜の工具たわみ量を測定し、工具たわみ量の実測値と理論たわみ量の比較を行った。

図 6-25 は切削距離と切削抵抗との関係を示したものである。同図から、TiSiN系コーティング薄膜はCrSiN系コーティング薄膜に比べて切削抵抗が低いことがわかる。

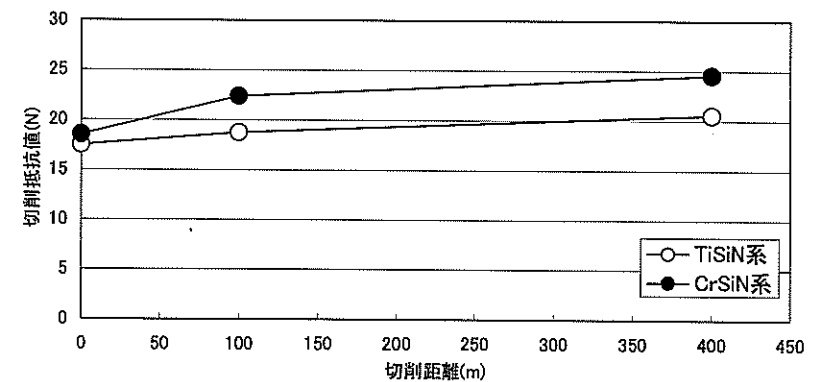


図 6-25 切削距離と切削抵抗の関係

また、両コーティング薄膜の切削抵抗値から理論工具たわみ量を算出した結果を図 6-26 に示す。同図より、これらの理論工具たわみ量を比較するとコーティング薄膜の相違による差異はほとんど認められない。

図 6-27 は、工具たわみ量の実測値と理論値を比較した結果を示したものである。これより、理論工具たわみ量にはほとんど差異が現れていないのに対し、TiSiN系コーティング薄膜の実測値はCrSiN系コーティング薄膜に比べて極めて低い値を示している。

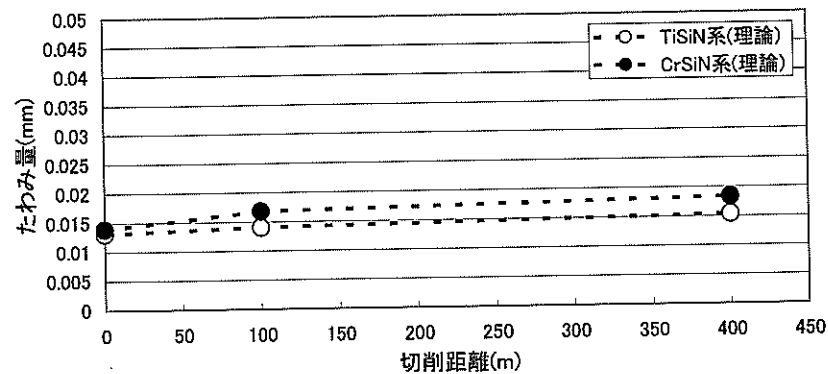


図 6-26 切削距離と理論工具たわみ量の関係

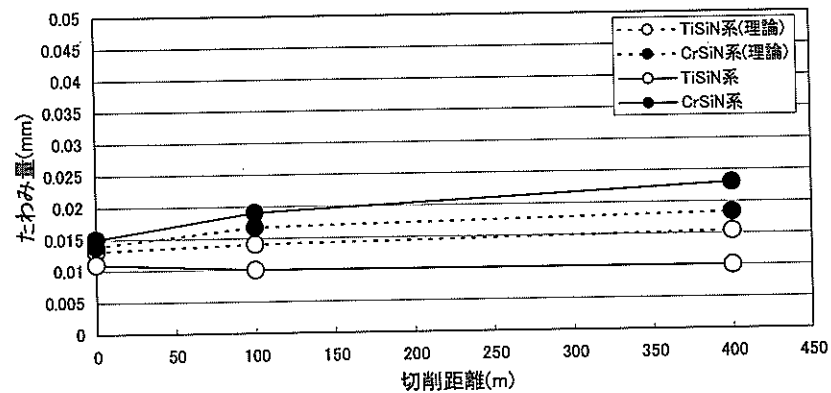


図 6-27 工具たわみ量の比較

すなわち、これらの結果よりTiSiN系コーティング薄膜は、工具たわみ量が抑制されていることが明らかである。つまりTiSiN系コーティング薄膜の実質切込み比率がCrSiN系コーティング薄膜に比べて良好になったのは、工具たわみ量が抑制されたことに起因している。

TiSiN系コーティング薄膜は従来のコーティング薄膜に比べて高い皮膜硬度を有している。すなわち、TiSiN系コーティング薄膜の機械的特性は他のコーティング薄膜に比べて向上していることが明らかであることから、皮膜硬度が工具たわみ量に対して大きな影響を与えたものと考えられる。

さらに、皮膜そのものの特性として残留応力の測定を行うと、TiAlN系コーティング薄膜は1.6 GPa、CrSiN系が1.3 GPa、TiSiN系が3.9 GPaとなる。なお残留応力の測定には、超硬製の板厚0.7~0.9 mmの試験片に各種のコーティング薄膜を被覆し、その試験片のたわみ量を測定し以下の式より算出した。ここで得られた残留応力の値とコーティング薄膜材質の硬度との関係を図 6-28 に示す。

$$\sigma = \frac{E_s \cdot D^2 \cdot \delta}{3 \cdot l^2 (1 - \gamma_s) \cdot d} \quad \dots (6-3)$$

$E_s$ : 被覆基体のヤング率(517GPa)

$D$ : 皮膜基体の厚み  $\delta$ : 試験片のたわみ量

$l$ : 最大たわみ量までのテストピースの長さ

$\gamma_s$ : 被覆基体のポアソン比(0.238)

$d$ : 皮膜の厚み



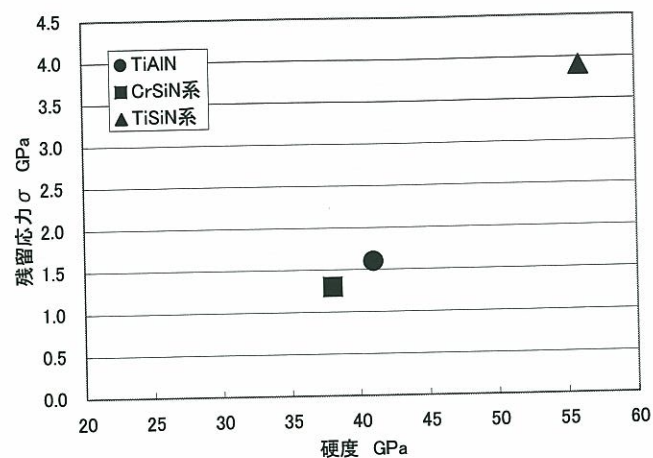


図 6-28 コーティング薄膜の硬度と残留応力の関係

この結果からもわかるように、TiSiN系のコーティング薄膜は他のコーティング薄膜に比べて2倍以上の残留応力が付与されており、これが曲げ応力に対してなんらかの影響を与えているものと考えられる。

### 6-3-3 コーティング薄膜材質の残留応力と工具たわみ量の関係

前記で述べたように、コーティング薄膜材質の残留応力が工具のたわみに対して影響を及ぼすかどうかを証明するために、図 6-29 に示すような実験用試料を準備した。また、この実験用試料を用いて刃部と首部に残留応力の異なるTiSiN系コーティング薄膜を $3 \sim 4 \mu\text{m}$ の膜厚に設定したものを被覆し、図 6-30 に示す実験用装置を用いて静荷重試験を実施した。

実験方法は、まず被削材に穴を設け、その中に実験用試料を被削材表面から $0.2 \text{ mm}$ の深さまで入れ、その状態で回転させずに送り速度が $2 \text{ mm/min}$ で被削材に接触させ、その時に発生する切削抵抗を3分力動力計で測定した。それらから得られる電圧変化をアナログデータロガーによって同一の時間軸で測定・記録した。この測定は、実験用試料が折損するまで続行してそれぞれの切削抵抗を計測した。

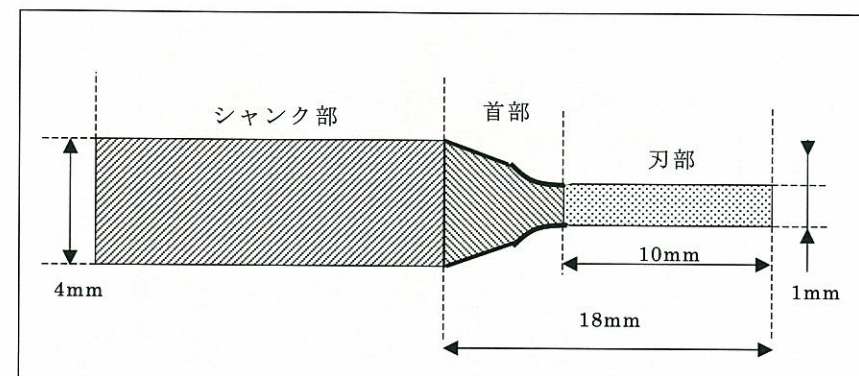


図 6-29 実験用試料の寸法

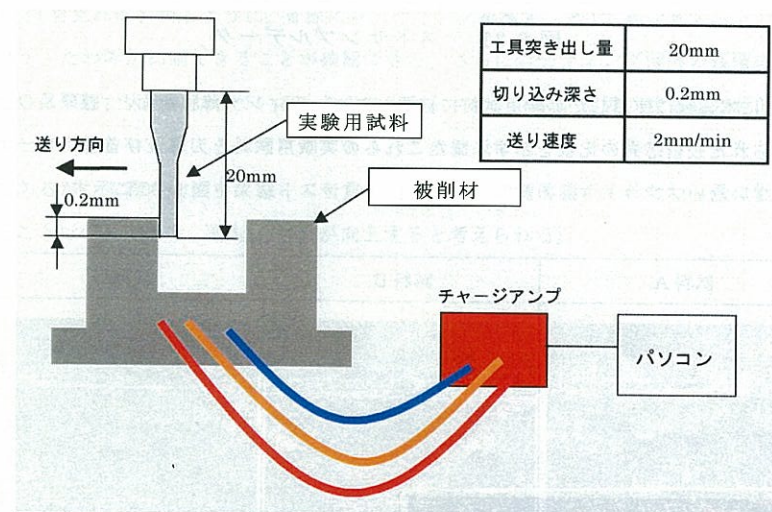


図 6-30 実験用装置

図 6-31 にテストデータのサンプルを示す。この図からもわかるように、実験用試料の先端部分に荷重が比例的に増加していき、あるところで折損し急激に荷重が下がっていることが確認できる。すなわち、それぞれの試料別に、このデータから得られる傾きを比較することで、試料の曲げに対する定量的な比較評価が可能と言える。

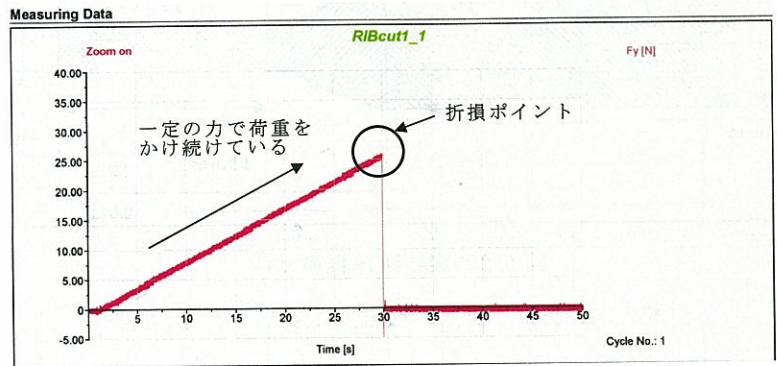


図 6-31 テストサンプルデータ

図 6-32 に本実験に使用した実験用試料に被覆したコーティング薄膜断面と、膜厚及びテスト試料で得られた残留応力の比較を示す。またこれらの実験用試料と刃部及び首部にコーティングを施していないノンコート品の試料を用いた静荷重テスト結果を図 6-33 に示す。

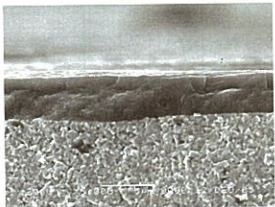
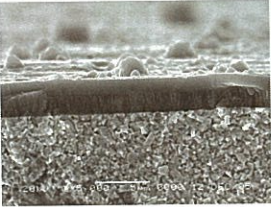
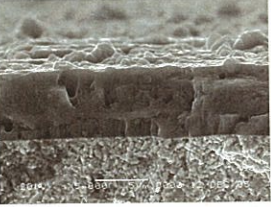
試料 A	試料 B	試料 C
		
膜厚：4.3 $\mu\text{m}$	膜厚：3.2 $\mu\text{m}$	膜厚：6.3 $\mu\text{m}$
残留応力：0.3 GPa	残留応力：3.1 GPa	残留応力：3.3 GPa

図 6-32 実験用試料に被覆したコーティング薄膜断面

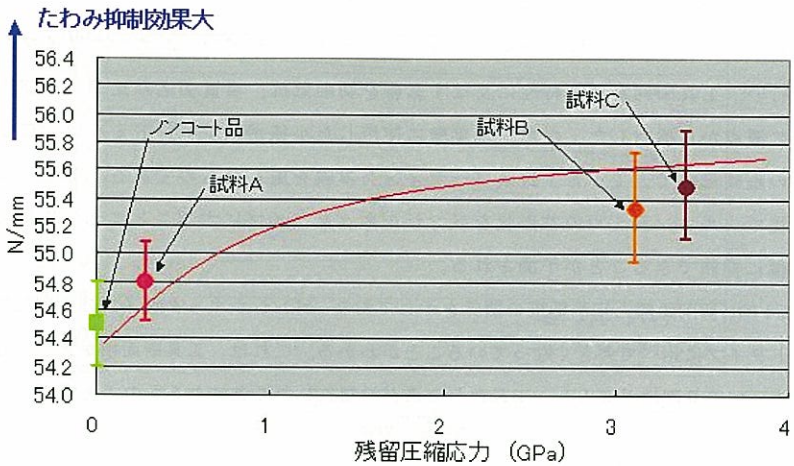


図 6-33 コーティング薄膜の残留応力とたわみ抑制との関係

図 6-33 を見ればわかるように、首部にコーティングを施すことで、静荷重テストの傾きが大きくなり、たわみが抑制できることが確認できる。さらにコーティング薄膜の残留応力が高いほどさらに傾きが大きくなっている。このことからコーティング薄膜の残留応力が工具のたわみに対して影響を与えることは明らかである。この結果はあくまでも静的な荷重をかけた際の傾向であるが、実際の切削中においても首部のコーティング薄膜が工具たわみ量に影響を与えていることは明白であり、機械的特性が向上すると考えられる。



## 6・3・4 エンドミルの首形状が工具たわみ量に及ぼす影響

小径ボールエンドミルの首形状をストレートタイプおよびペンシルネックタイプとして試作を行い、工具摩耗が切削特性に及ぼす影響を切削抵抗、実質切込み比率および工具たわみ量の観点から検討した。なお、本実験に使用した小径ボールエンドミルは、C<sub>60</sub>含有量8%の超硬母材で、TiSiN系コーティング薄膜を施したものである。前述したように、小径ボールエンドミルの首形状をペンシルネックタイプにすることにより工具たわみ量を大幅に抑制できることが予測される。

図6-34は、切削距離と切削抵抗の関係を示しており、ペンシルネックタイプの切削抵抗はストレートタイプに比べて大きくなっていることがわかる。これは、工具断面積が大きくなったことによって工具剛性が向上し、工具たわみ量が抑制されたことによるものである。

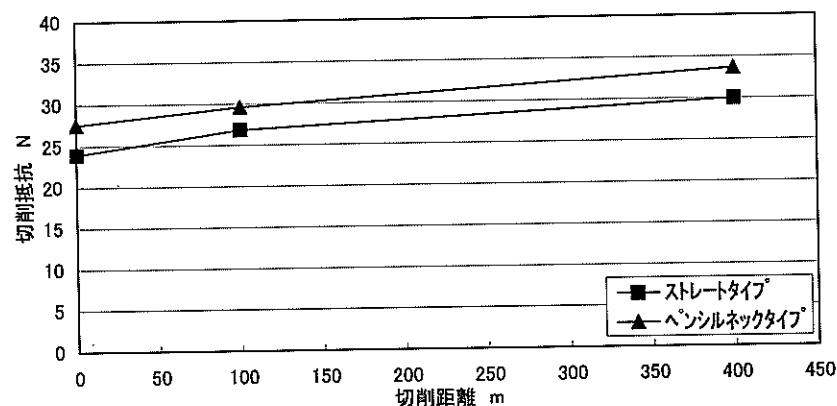


図6-34 切削距離と切削抵抗の関係

図6-35は、切削距離と実質切込み比率の関係を示したものである。この図より、ペンシルネックタイプの小径ボールエンドミルの実質切込み比率はストレートタイプと比較して非常に高い値を示していることがわかる。この要因としては、工具断面積が大きくなったことによる工具剛性の向上と工具摩滅量が抑えられたことによる影響が考えられる。ここで、図6-36に切削距離と工具摩滅量の関係を示す。この図からわかるように、工具摩滅量はストレートタイプおよびペンシルネックタイプにおいてほとんど差異が認められない。つまり、実質切込み比率への影響因子は、工具摩耗ではなく工具剛性に起因しているものと考えられる。

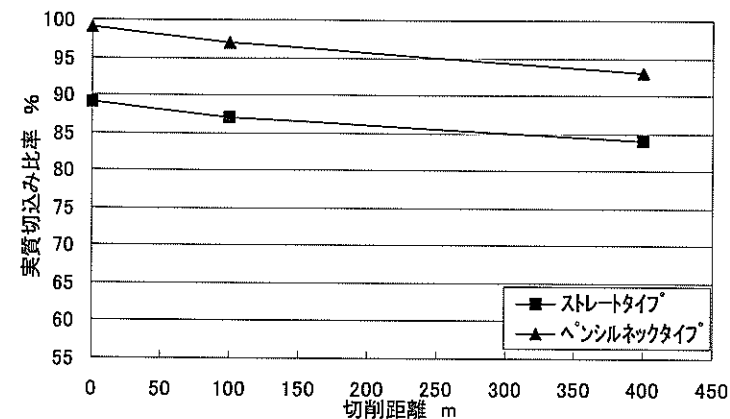


図6-35 切削距離と実質切込み比率の関係

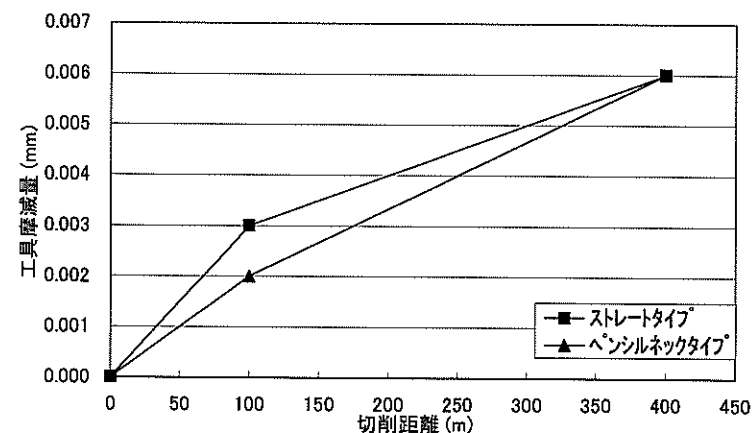


図6-36 切削距離と工具摩滅量の関係

また、図6-37は工具摩滅量を考慮したときの切削距離と工具たわみ量との関係を示しているが、小径ボールエンドミルの首形状をペンシルネックタイプにすることにより工具たわみ量をかなり抑制できることがわかる。

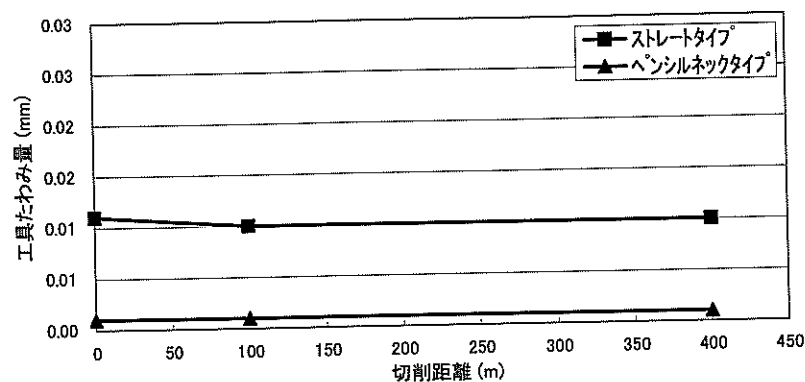


図 6-37 切削距離と工具たわみ量の関係

図 6-38 は、ストレートタイプおよびペンシルネックタイプにおいて静荷重テストを行った際の工具たわみ量と静荷重値との関係を示したものであるが、首形状をペンシルネックタイプにすることにより工具たわみ量を大幅に抑制できることは明らかである。

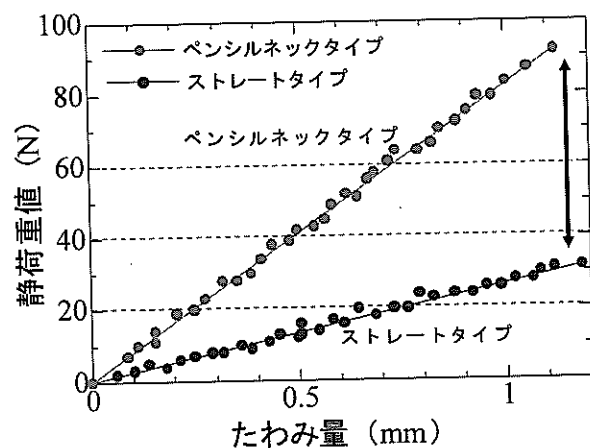


図 6-38 工具たわみ量と静荷重値の関係

#### 6-4 結言

本章では、ボールエンドミルの突出し量を一定にし、工具母材である超硬合金の組成を変化させ、工具へ成膜するコーティング薄膜材質の種類を変え、さらに工具剛性の影響を解明するために首形状を変化させて加工特性に及ぼす影響についての検討を行った。また、工具たわみ量を生じる要因を定量的に検討し、小径ボールエンドミルの深彫り加工における性能因子の最適化に対する検討を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 切削距離の増大にともなって切削抵抗は比例的に増大するが、超硬母材のC<sub>o</sub>含有量が増加しても切削抵抗にはあまり影響を及ぼさない。一方、加工誤差に対してはC<sub>o</sub>含有量に大きく依存し、工具たわみ量の抑制効果に対してではなく、耐摩耗性、つまり工具摩滅量の抑制効果に対して支配的に影響を及ぼしている。超硬母材の粒径0.6  $\mu$ mにおいてC<sub>o</sub>含有量8~10%が最も良好な切削特性が得られる。

(2) 工具表面にコーティング薄膜を施した小径ボールエンドミルによる深彫り加工を行った結果、TiSiN系コーティング薄膜はCrSiN系コーティング薄膜に比べて加工誤差が少ない。この要因としては工具摩滅量がほぼ同等であることから、皮膜硬度の高いTiSiN系コーティング薄膜によって機械的特性が向上し、工具たわみ量の抑制に繋がる。

(3) 工具首形状をペンシルネックタイプにすることによって、工具剛性を増大することができ、工具たわみ量を抑制することができる。しかし、工具剛性の向上によって工具摩耗を抑制することはできない。

(4) 小径ボールエンドミルによる深彫り加工において、切削距離の増大に伴う加工誤差の発生を抑制するには、工具摩滅量を抑制すること、工具たわみ量を抑制することが必要である。

## 第7章 工具のびびり振動対策と最適化

### 7-1 緒言

前章では工具突出し量を一定にし、工具母材である超硬合金の組成を変化させ、工具へ成膜するコーティング薄膜材質の種類を変え、さらに工具剛性の影響を解明するためにエンドミルの首形状が加工精度に及ぼす影響についての検討を行った。その結果、工具母材はC<sub>o</sub>量の最適化によって工具摩耗が抑制されること、TiSiN系コーティング薄膜が工具たわみ量に対して抑制効果を有すること、首形状をペンシルネックタイプにすることにより工具たわみ量を大幅に抑制できることを確認した。また、その際の工具摩滅量を定量的に把握することにより、深彫り加工において高精度加工を実現できることを明らかにした。

本章では、深彫り加工時における仕上げ面性状について実験的に把握することにより、切削中に発生するびびり振動に関する検討を行う。一般的にびびり振動が発生すると仕上げ面は悪化するとともに加工精度に対しても悪影響を及ぼす<sup>1)</sup>。すなわち、深彫り加工における高精度加工を実現するためには、このびびり振動を抑制することが必要不可欠となる。

そこで、まずびびり振動が発生する要因を明確にし、その対策に対する検討を行う。さらに、工具摩滅量を定量的に把握し、それを加工プログラムへ反映する方法を模索して深彫り加工における高精度加工の実現を目指すものである。

### 7-2 びびり振動が発生する要因

すでに述べてきたように、深彫り加工を行う場合には必ず工具たわみを発生する。その工具たわみを発生することによって、工具刃先に不確定な応力が掛かるため、その変動に伴ってびびり振動が発生する<sup>2)</sup>。そこで深彫り加工時における切削現象を解明し、工具精度の観点からびびり振動を抑制する手段についての検討を行った。

#### 7-2-1 実験方法

工具たわみを発生しやすい環境下での切削挙動に関して実験を行うため、前章まで使用

## 参考文献

- 1) 高橋一郎, 安斎正博: 精密工学会誌, 第65巻第6号, (1999)867.
- 2) 河手昌大, 木村綾子: 2001年精密工学会春季大会講演論文集, (2001)418.
- 3) 沖猛雄, 上田重明: PVD・CVD皮膜の基礎と応用 (社)表面技術協会(1994)
- 4) 麻蒔立男: 薄膜作成の基礎(第3版) 日刊工業新聞社(1998)
- 5) 石川剛史: 機械と工具, Vol.45No.12, (2001)67.
- 6) 例えば、日立ツールのカタログ(Coating Technology)
- 7) 目崎俊介: 機械と工具, Vol.45No.9, (2001)84.
- 8) 夏目実, 今泉英明: 機械と工具, Vol.46No.9, (2002)48.
- 9) 竹園茂男: 基礎材料力学 株式会社朝倉書店 2000.
- 10) 鈴木壽: 超硬合金と焼結硬質材料 基礎と応用, 丸善株式会社, (1991)134.

していた工具よりもさらに刃径の小さいボールエンドミルを使用した。表 7-1 に本実験に使用した小径ボールエンドミルの仕様を示す。また、切削中のびびり振動の影響を工具形状の観点から明らかにするため、図 7-1 に示すような2種類の工具刃型形状を有する小径ボールエンドミルを試作した。

表 7-1 供試小径エンドミルの仕様

供試工具の各仕様サイズ	
刃先 R mm	0.5
刃径 D mm	1
首下長さ ln mm	10
刃長 l mm	0.8
工具首形状	ストレート, ペンシルネック
シャンク径 d mm	4
全長 L mm	50

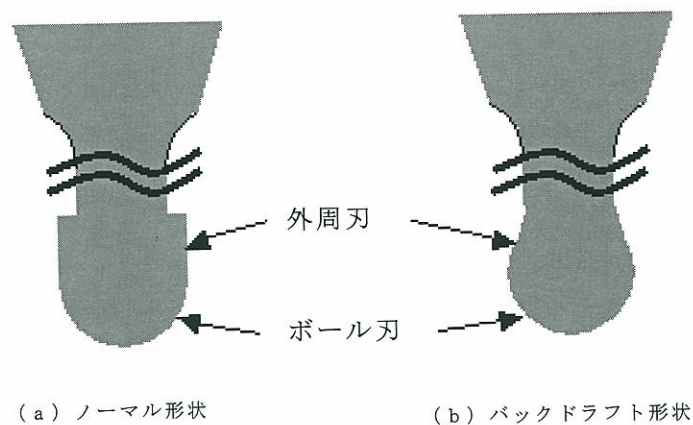


図 7-1 工具刃型形状

ここで、図 (a) に示す形状は一般的な刃型形状であり、前章までに使用した小径ボールエンドミルはすべてこの形状である。また、図 (b) に示す形状は外周刃部分にバックテーパを大きく設けた形状となっており、外周刃が加工面に干渉することを回避する設計にしている。

実験に用いた被削材形状は、図 7-2 に示すように  $90^\circ$  の角加工を行う直角形状で  $1^\circ$  勾配面を加工面に持たせている。ここで、切削方法としては切込み量一定で負荷変動の小さい等高線切削を採用した。つまり、加工方法が等高線切削であることから外周刃は理論的には作用せず、ボール刃だけで加工が行われるはずである。その際の切削条件は表 7-2 に示すとおりである。使用した小径ボールエンドミルの首形状は、ストレートタイプおよびペンシルネックタイプのものであり、後者は工具たわみ量の改善を見込むことができる。

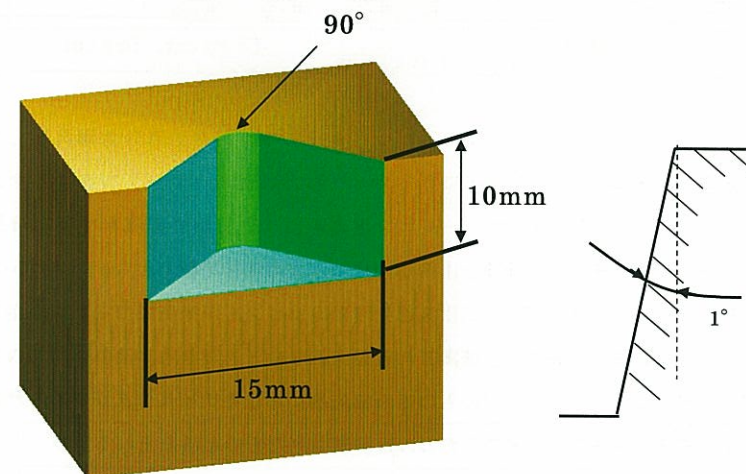


図 7-2 被削材形状



表 7-2 切削条件

回転数 min <sup>-1</sup>		20,000
切削速度 m/min		63
送り速度 mm/min		1,600
一刃送り mm/tooth		0.04
切込み量	Y方向 mm	0.05
	Z方向 mm	0.05
被削材		STAVAX (52HRC)
切削方式		Down cut, Dry cut

## 7-2-2 実験結果および考察

図 7-3 はノーマル刃型形状の小径ボールエンドミルについて切削実験を行った結果を示したもので、図 7-2 に示した工作物を1個切削後の工具摩耗を比較したものである。エンドミルの首形状がストレートタイプの場合はR部先端にチッピングが発生していることから、工具たわみによる振動を伴う不安定な切削加工に起因するものと思われる。それに対し、エンドミルの首形状がペンシルネックタイプの場合はR部先端におけるチッピングが認められない。すなわち、工具剛性の向上によって工具たわみは抑制されたものと考えられる。

しかしながら、その摩耗形態において逃げ面方向に異常摩耗が観察され、明らかにびびり振動による影響が確認できる。前述したが、この工作物形状を加工する場合にエンドミル外周刃部は理論上干渉しないことになる。しかしながら、同図の外周刃部の摩耗写真では、ストレートタイプおよびペンシルネックタイプともに外周刃部にチッピングを生じていることが観察される。これは、切削中の工具たわみによって外周刃部が加工面に接触したことによるものと考えられる。

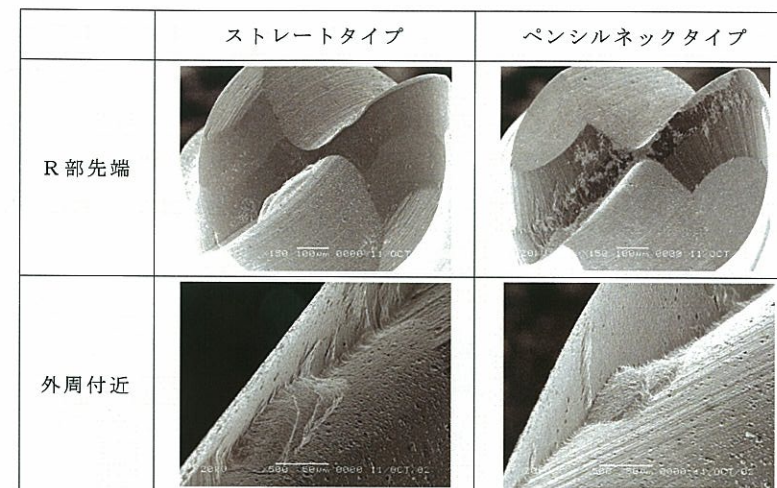


図 7-3 切削後の工具摩耗の比較

次に、工具剛性の点で有利なペンシルネックタイプにおいて、工具刃型形状の影響を明らかにするためにノーマル形状およびバックドラフト形状の2種類の小径ボールエンドミルを用いて切削実験を行った。

図 7-4 は切削後の被削材加工面の写真を示したものである。この図から、ノーマル形状においては外周刃部の接触から発生した切削痕が確認されるが、バックドラフト形状においては全くそのような切削痕が確認されないことから、工具刃型形状によってびびり振動が抑制されているものと考えられることができる。

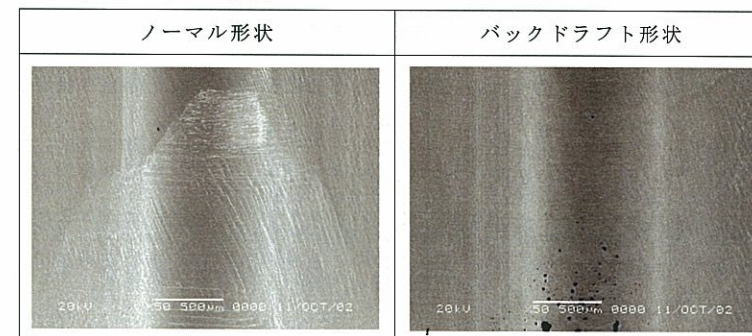


図 7-4 切削後の加工面



また、その際の小径ボールエンドミルの摩耗状態を比較したものを図 7-5 に示すが、バックドラフト形状はR部先端の摩耗状態も安定しており、チッピングおよび異常摩耗は全く認められない。このことから、切削中におけるびびり振動が抑制されているものと考えられる。実際に同図に示すバックドラフト形状の外周刃部の摩耗形態を観察すると、チッピングやこすれた摩耗形態も観察されないことから、外周刃部が加工面と接触しないことでびびり振動が抑制されたことは明らかである。

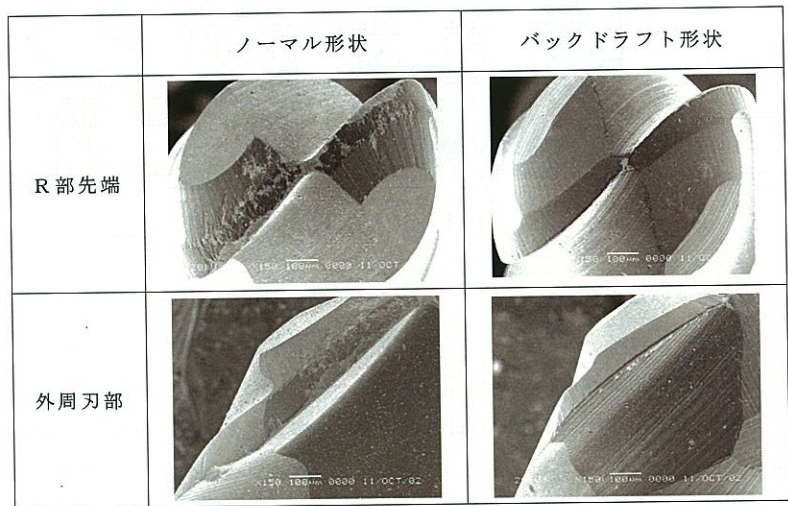


図 7-5 切削後の工具摩耗の比較

さらに、これらの加工面をより詳細に観察するために非接触3次元面粗さ測定器（1 L M21; LASERTEC社製）を用いた。その結果を図 7-6 に示す。この図から、ノーマル形状による加工面は外周刃部による接触痕が多数存在し、仕上げ面の状態もかなり悪化していることが認められる。それに対して、バックドラフト形状による加工面上には外周刃部による接触痕は全く存在しておらず、このことからびびり振動を抑制できていることが明らかである。

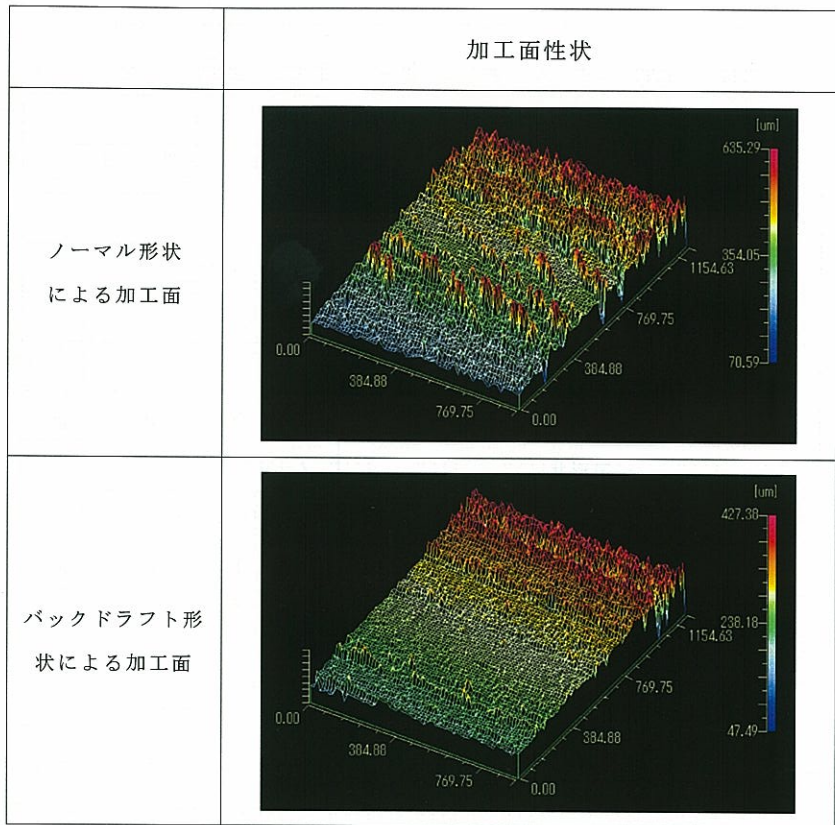


図 7-6 加工面性状の比較

ここで、工具形状をバックドラフト形状にすると、刃部剛性が低下することが懸念されるため、バックドラフト形状を採用したエンドミルとノーマル形状のものと比較を表 7-3 に示すように工具径 2 mm、首下長さ 10 mm の小径ボールエンドミルを用いて、切削実験を行った。実験条件は表 7-4 に示すとおりである。

表 7-3 供試小径ボールエンドミルの仕様

刃先 R mm	1
刃径 D mm	2
首下長さ ln mm	10
刃長 l mm	1.7
シャンク径 d mm	4
全長 L mm	50
首形状	ペンシルネックタイプ
刃形状	ノーマル、バックドラフト
超硬母材	素材A (8%Co)
コート	TiSiN系

表 7-4 切削条件

回転数 min <sup>-1</sup>		1 0 0 0 0
切削速度 m/min		6 3
送り速度 mm/min		1 4 0 0
一刃送り mm/tooth		0 . 0 7
切込み量	Y 方向 mm	0 . 1
	Z 方向 mm	0 . 1
切削長 m		0 , 1 0 0 , 4 0 0
被削材		STAVAX (52HRC)
切削方式		Down Cut, Dry Cut

図 7-7 は、切削距離と実質切込み比率の関係を 2 種類の刃型形状について比較したものである。同図より、刃型形状の相違による影響はほとんど認められず、工具たわみ量にはほとんど依存していないと言える。すなわち、バックドラフト形状による工具剛性の低下はほとんど認められず、仕上げ面性状と加工精度の両観点から優れた切削特性が得られることが明らかである。

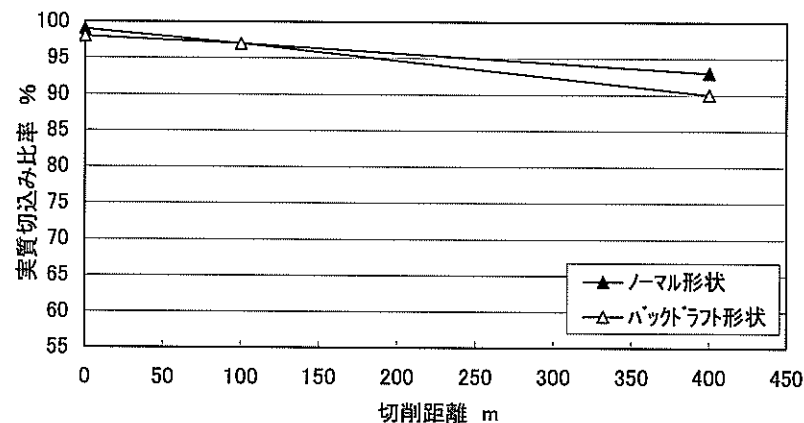


図 7-7 切削距離と実質切込み比率の関係

すなわち、小径ボールエンドミルによる深彫り加工において、切削中のびびり振動を抑制するにはバックドラフト形状が有効的であることは明白である。

### 7-3 深彫り加工における高精度化

前節までの実験結果より、小径ボールエンドミルを用いた深彫り加工における形状誤差を抑制する手段について提案してきた。またすでに述べたように高精度な仕上げ面を得るためには切削時におけるびびり振動を抑制することが最も重要である。

さらに、実際の生産現場において形状誤差の少ない高精度加工を実現するためには、NCプログラムにこれらの解析結果をフィードバックする必要がある。そこで、本節では提案した最適形状の小径ボールエンドミルを選定し、切削距離の増大に伴う工具補正必要量

を算出し、それをNCプログラムへフィードバックする手段についての検討を行った。

### 7-3-1 工具補正必要量の算出

前述のように外周刃部の加工面への接触を回避し、びびり振動を抑制することによって深彫り加工においても高品位な仕上げ面を得ることがわかった。また、工具たわみ量に依存する因子を最適化することによって、工具たわみ量のある程度制御することができ、工具摩滅量を把握すれば工具たわみ量を定量的に判断することができる。そこで、表 7-5 に示す仕様の最適小径ボールエンドミルを用いて切削時の補正值の設定を試みた。

表 7-5 供試小径ボールエンドミルの仕様

母材	素材 A (8%Co)
コート	TiSiN系
首形状	ペンシルネックタイプ
刃形状	バックドラフト形状

同仕様のエンドミルを用いて表 7-4 に示した切削条件によって切削実験を行った。その際に切削距離 0, 50, 100, 200, 300, 400 mm における加工面をデータとして採取し、前章で行った方法によってそれぞれ加工段差を測定した。その測定結果には、加工中に発生する工具摩滅量が含まれていることになるため、この値から工具補正必要量の算出を行った。

ここで、必要な情報は切削距離ごとの工具補正必要量であることから、その工具補正必要量の算出には多項式の 2 次関数を用いて近似式を求めた。その近似式は以下のようになり、またその結果を図 7-8 に示す。

$$Y = -2 \cdot 10^{-8} \cdot X^2 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot X + 0.0021 \quad (8-1)$$

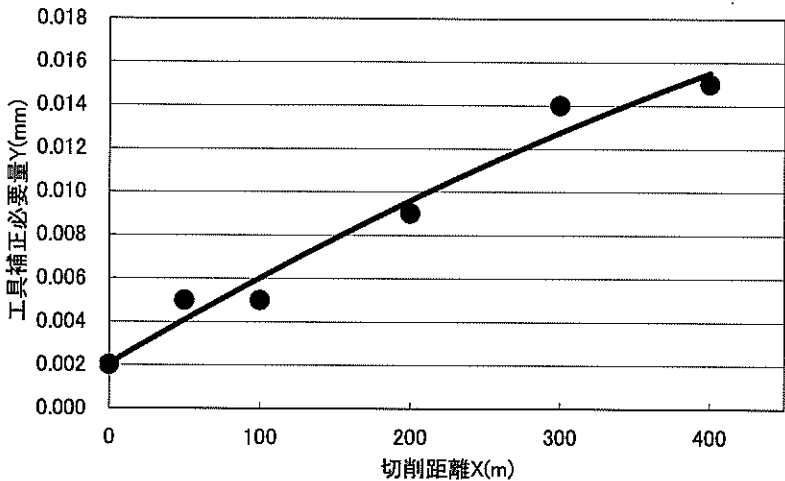


図 7-8 切削距離と工具補正必要量の関係

### 7-3-2 工具たわみ量と工具摩滅量を考慮した新補正方法

CAM技術の目標は、CADによって設計された部品をどの工作機械で加工するかが指定された場合、機械の動作指令となるNCプログラムを自動的に作成することにある。最近では、等高線加工を主体とする高速加工に適した加工パスは比較的簡単に作成できるようになっている。

本実験においても、CAD（グラフィックプロダクツ社製：Tools V3）で加工モデルデータを作成してCAM上でツールパスを導出し、DNC運転によって切削加工を行っている。



図 7-9 は CAD/CAM を利用した NC 加工の流れを示したものであるが、一般的に CAD/CAM を利用して切削加工を行う場合、まず CAD 上でモデル形状を作成し、その後に CAM 内で加工工程を作成して工具径や切削条件等を設定する。それを演算、シミュレーションしてツールパスを作成し、NC データとして工作機械側で DNC 運転を行うが、小径ボールエンドミルを用いて深彫り加工を行う場合には、工具たわみ量によって大きな加工誤差を発生することになる。

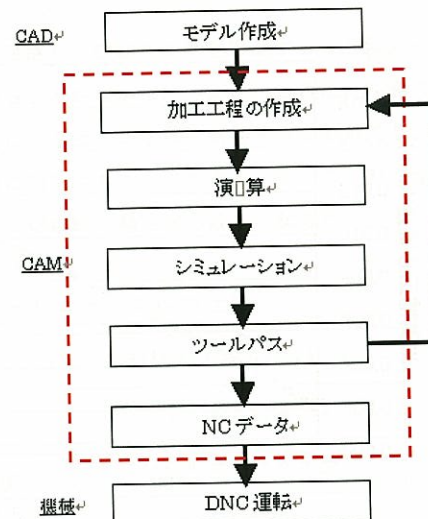


図 7-9 CAD/CAM を利用した加工の流れ

あらかじめエンドミルのたわみ量を想定することができれば、NC プログラム内で調整することは可能である。その場合、CAM における加工工程の作成の際に工具たわみ量をあらかじめ工具径や仕上げ代の設定で補正すれば良いことになる。図 7-10 にその一例画面を示す。

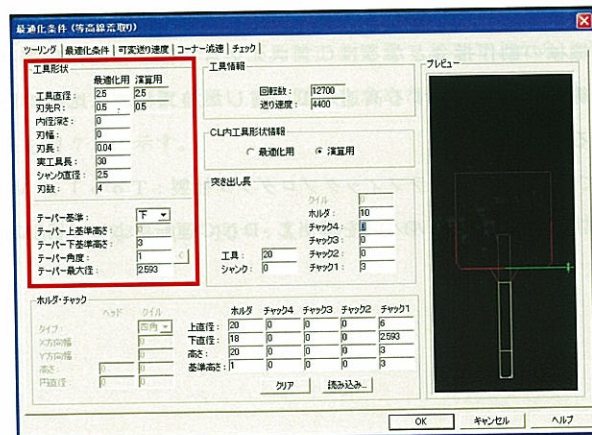
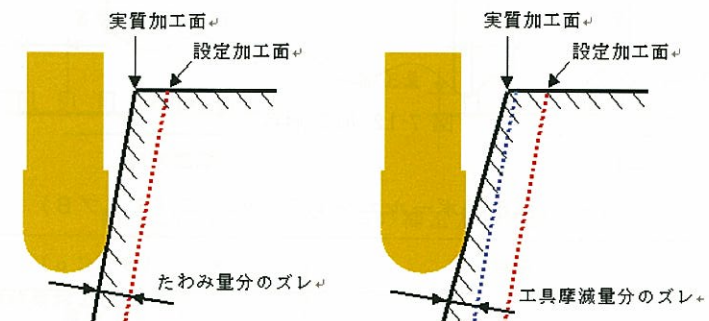


図 7-10 加工工程設定の一例

ただし、この場合ある一定量の形状補正しかできないため、工具たわみ量を理論的に算出しても設定寸法との差異を発生することになる。図 7-11 に切削加工モデルを示すが、実際にエンドミルのたわみ量を考慮に入れ、あらかじめ CAM データの工具サイズに補正値を入れて加工することは、ロングネックタイプのエンドミルを使用する場合には有効的な手段と言える。そうすることにより、同図 (a) に示すように工具たわみ量分のズレを補うことができる。しかしながら、長時間にわたって切削加工を行うと、エンドミル切れ刃は摩耗して工具径方向に摩滅が進行するために工具たわみ量以上の削り残しを発生することになる。そのため、同図 (b) に示すように被削材の設定寸法に対してズレを生じる。



(a) 工具たわみ量の影響

(b) 工具摩滅量の影響

図 7-11 寸法誤差の発生現象

そこで、工具摩滅量分の寸法ズレを解消するように、従来の補正方法とは全く異なった方法によって NC プログラムを作成し、従来の加工プログラムとの比較を行った。図 7-12 には、実験に使用した加工形状を示している。また、実験に使用した小径ボールエンドミルは表 7-5 に示す前章までの実験結果から最適化した仕様のもの（タイプ A と称す）と表 7-6 に示す仕様のもの（タイプ B と称す）であり、両者を比較した。

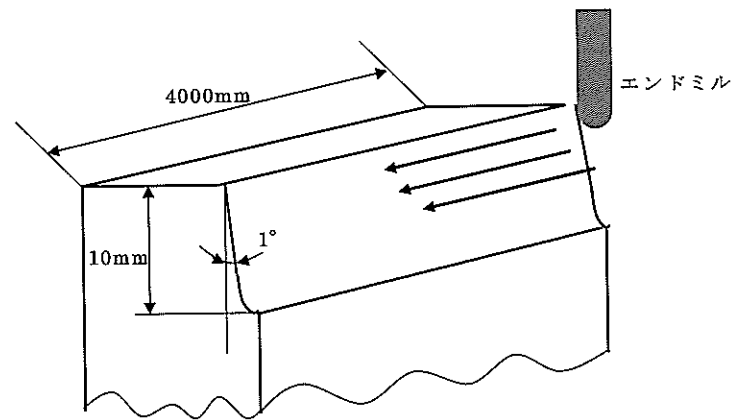


図 7-12 加工形状

表 7-6 供試小径ボールエンドミルの仕様 (タイプB)

母材	素材A (8%Co)
コート	TiSiN系
首形状	ストレートタイプ
刃形状	ノーマル形状

高精度な切削加工を行う場合、NCプログラムに補正をかける際に工具たわみ量を考慮に入れてプログラム内の工具径を変更することにより、削り残し量のある程度補正することができる。この場合には、工具径が補正されるため、全体の加工形状に影響を及ぼすことになる。しかしながら、エンドミルは切削距離が増加すると、工具刃径方向に摩滅が進行するために加工誤差を生じる。本実験においては、等高線切削によって行ったためにZ軸下方向に加工が進むと切削距離が非常に長くなるため加工誤差が漸増することが予想される。

ここで、本実験によって実施した小径ボールエンドミルの全切削距離は400mとなり、

図 7-8 において求めた切削距離ごとの補正値をこれに採用することができる。また、その際の補正方法は従来の方法とは異なり、Z方向の一回の切込みごとにその補正必要量を座標値に反映させる方法をとった。すなわち、従来のように一定の補正値を与えるのではなく、切込みごとに補正値が変化する方式をとっている。その補正方法の概略を図 7-13 に示す。この方法によって、工具摩滅の進行による加工誤差をも同時に補正することが可能となる。

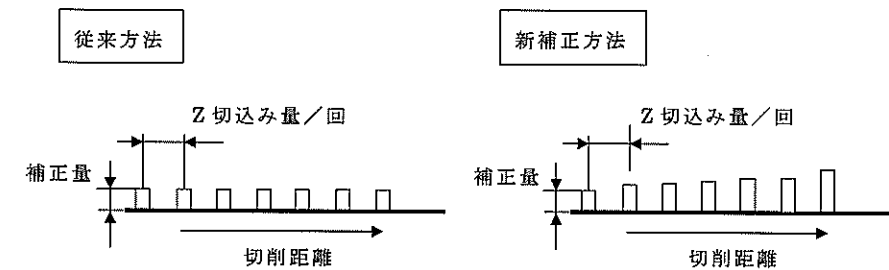


図 7-13 NCプログラムの補正方法の概略

### 7-3-3 実験結果および考察

図 7-14 は、加工した被削材形状を接触式3次元面粗さ測定機 (SURFCOM1500DX; 東京精密社製) で測定した結果を示したものである。同図において、タイプBの小径ボールエンドミルを用いて補正値を全く付与せずに切削加工を行うと加工段差が極めて小さくなっており、設定値に対して大きくズレを生じていることがわかる。それに対して、タイプAの小径ボールエンドミルを用いて補正値を代入したNCプログラムで加工を行うと加工段差が設定値に極めて近いことが明らかである。



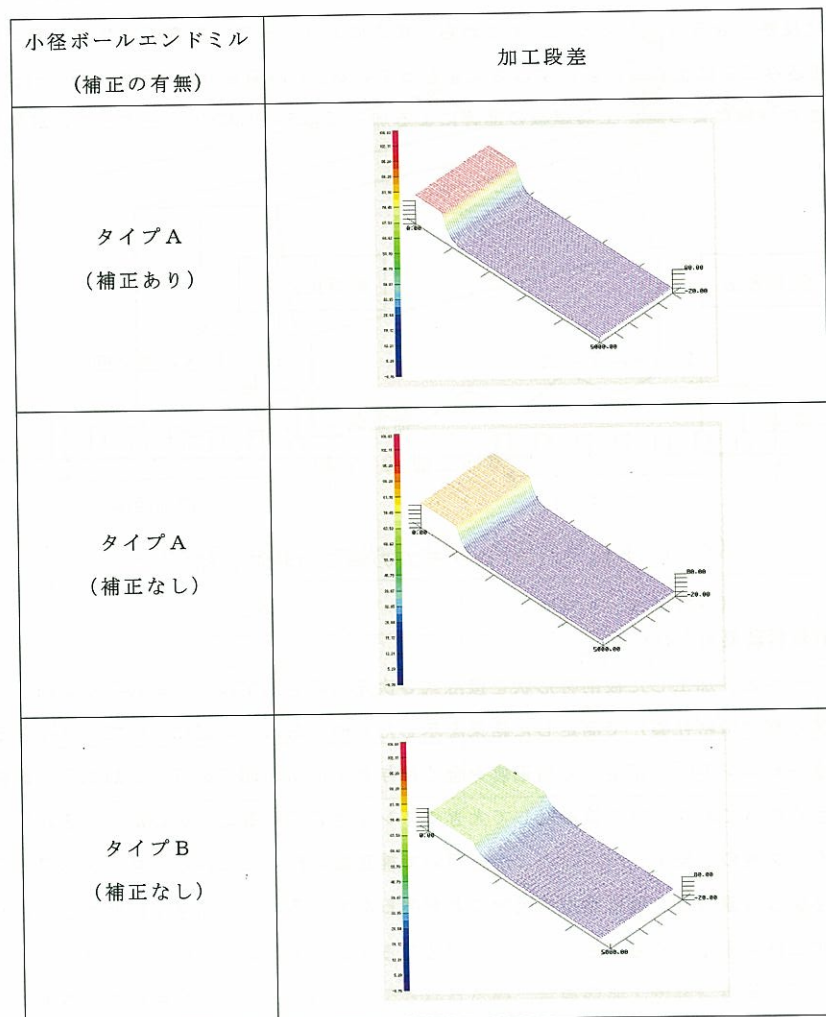


図 7-14 被削材形状の比較

また、図 7-15 にはそれぞれの小径ボールエンドミルで加工した際の実質切込み量と加工面傾斜角を示している。同図より、タイプBの小径ボールエンドミルを用いてNC加工プログラム

上で補正を与えない場合には、理論切込み量に対して約60%の実質切込み量しか得られていないことがわかる。また、切削距離が増大して工具摩耗が進行することから、加工面の底面方向に向かって加工誤差が増大し、結果的に仕上がり寸法として傾斜角に大きな誤差を生じたものと考えられる。一方、タイプAは前述したように最適工具形状の効果によって、実質切込み量は大幅に改善されており、工具摩耗の進行が抑えられていることからNC加工プログラムに補正量を与えなくても傾斜角の誤差が少ないことがわかる。しかしながら、切削距離の増大に伴って工具摩滅量が進行するために加工誤差は発生している。それに対して、同じ仕様の小径ボールエンドミルであっても切削実験より得られた補正必要量をNC加工プログラムに導入することで、小径ボールエンドミルのタイプA（補正あり）の実質切込み量は理論切込み量にほぼ一致することが明らかである。さらに、傾斜角も設定角度の1°とよく一致しており、深彫り加工においても高精度加工が実現できることが証明された。

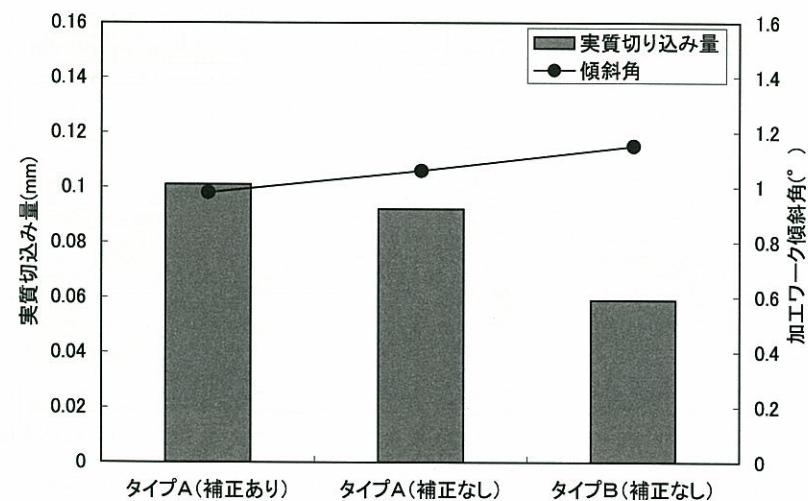


図 7-15 実質切込み量と加工ワーク傾斜角の比較

図 7-16 は、被削材の仕上げ面性状と仕上げ面粗さのプロフィールを示したものである。同図から、タイプAの小径ボールエンドミルによる仕上げ面性状はタイプBのそれに比べて格段に良好な結果を示していることがわかる。さらに、詳細に観察するとタイプBの小径ボールエンドミルによる仕上げ面は切込み方向への加工段差が明確に認められるとともに

に切削面に凝着物が確認できる。

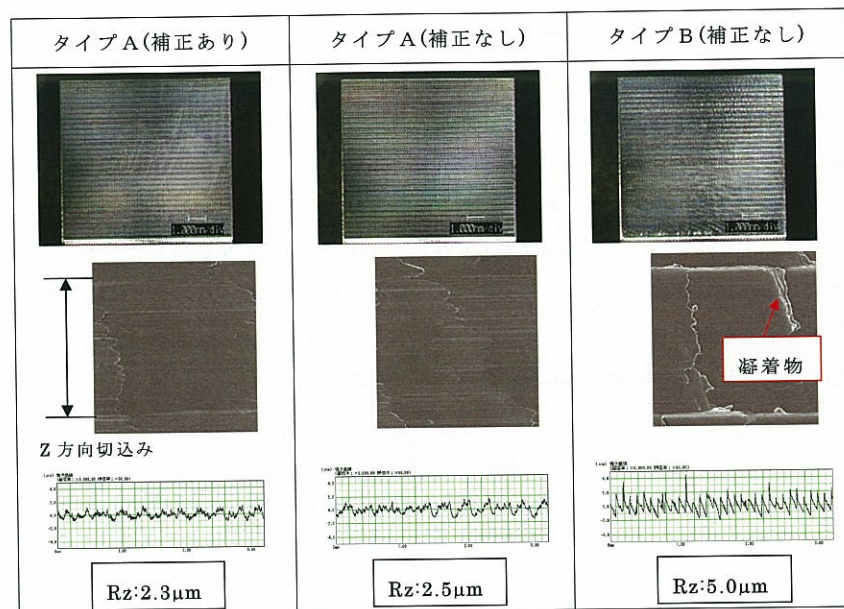


図 7-16 加工ワーク仕上げ面性状の比較

これは、図 7-17 に示す加工面のそれぞれの3次元測定結果からも明らかである。同図において、タイプAの仕上げ面性状は比較的均一であるのに対し、タイプBの仕上げ面性状は切削面に付着した凝着物が確認できる。さらに、より詳細に観察した加工面を図 7-18 に示しているが、タイプBの仕上げ面性状を観察すると勾配面の途中に外周刃部が接触したことによる加工傷が確認できる。それに対し、タイプAの仕上げ面性状には全くそのような傷は確認されない。このことから、工具形状の最適化によって仕上げ面精度を向上させることが可能であると言える。

すなわち、これまでに述べてきたように工具たわみ量に影響を及ぼす要因を最適化し、小径ボールエンドミルの工具摩滅量の傾向を把握して、新しい補正方法によってNC加工プログラムを作成することにより、深彫り加工においても加工精度および仕上げ面精度の両観点から高精度加工を実現することができる。

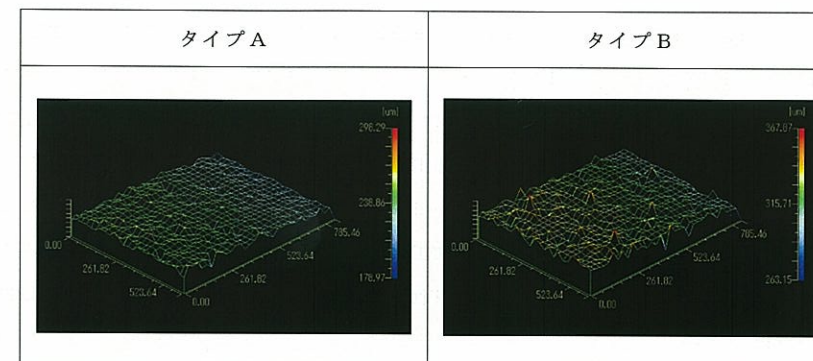


図 7-17 仕上げ面性状の比較(1)

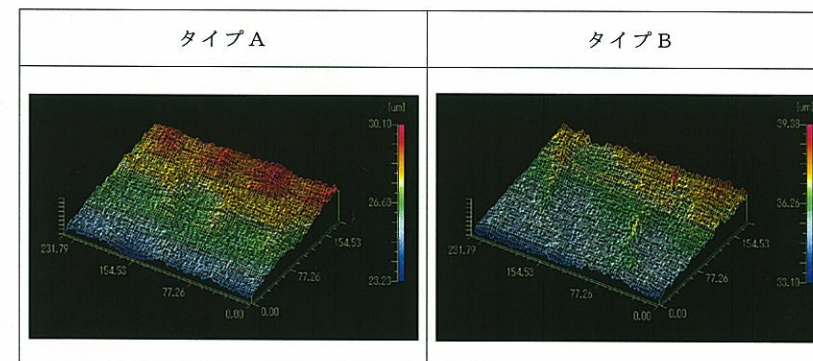


図 7-18 仕上げ面性状の比較(2)

## 7-4 結言

本章では、深彫り加工時における仕上げ面性状について解明を行うとともに、切削中に発生するびびり振動に関する検討を行った。とくに、びびり振動を発生する要因を明確にし、その対策の検討を行った。さらに、工具摩滅量を定量的に把握し、それをNC加工プログラムへ導入する方法を模索し、深彫り加工における高精度加工の実現を目指した。

その中で、以下の結果を得た。

(1) 小径ボールエンドミルによる深彫り加工において、仕上げ面性状は外周刃部の加工面への接触から発生するびびり振動に左右され、バックドラフト形状にすることによりその発生を抑制できる。

(2) 最適工具形状を選択し、NC加工プログラムに1パスごとに補正値を代入する新しい補正法により、長時間にわたる高精度加工が実現できる。

## 参考文献

- 1) 山田真次郎, 神雅彦: 精密工学会誌, 第69巻第7号, (2003)939.
- 2) ツールエンジニア編集部編著: エンドミルのすべて 大河出版 1988
- 3) 星鐵太郎: 機械と工具, Vol.45No.11, (2001)13.
- 4) 久保埜義孝: 機械と工具, Vol.45No.11, (2001)32.

## 第8章 結論

近年、製品サイクルが急激に早くなってきており、ものづくりの短納期化に関する要求がますます高くなってきている。そのような中で、金型は汎用品から自動車部品などの機械部品、光学機器部品、電子機器部品などのハイテク製品までのあらゆる分野で利用されており、今日の産業界にとって不可欠なツールになっている。射出成形金型は射出成形機の射出シリンダで加熱、加圧された溶融樹脂をキャビティに受け取り、樹脂の熱量を金型に熱交換しながら、樹脂を固化し成形品にするツールである。金型品質の成形加工に対する影響度は70～80%といわれ、しかもその70～80%が金型設計に起因するといわれ、金型設計は成形に対し50%以上の影響力をもっていると言える。したがって、成形品の品質と生産性は金型の品質次第といっても過言ではない。

その中で、金型の深彫り加工に注目すると、従来はその大部分を放電加工に頼っており、高能率化に対する要求が満たされていないのが現状である。それに対して、高能率とされるエンドミル加工においては、その切削機構の観点から小径エンドミルによる高精度加工が極めて困難であるとされてきた。

エンドミルは、非常に高精度かつ高能率な切削工具であるが、エンドミルの全長が長くなって工具突出し量が増大すると剛性が低くなり、びびり振動の誘発などによって切削状態が不安定になり、加工精度が低下してエンドミル本来の利点が損なわれることになる。特に、金型材料の高硬度化の進展によって、より一層工具たわみ量が増大し、工具摩耗も大きくなることから切削加工を適用することは極めて困難となる。一方、放電加工では切削抵抗などの影響を受けることなく加工ができるために深彫り加工に広く採用されている。しかしながら、放電加工は工程数が多く、加工能率が低いという欠点を有しており、加工変質層を生じやすく火災の危険を伴うこともあり、現在の高能率化へのニーズを十分に満足するには至っていない。

以上のように、小径エンドミルを用いた深彫り加工には数多くの問題点が残されており、生産レベルにおける切削加工技術は一般的な切削加工に比べて十分に確立されていないの



が現状である。

本論文の研究対象およびそれに関する提案事項は、これらの課題に対し深彫り加工の高精度加工の実現に向け、あらゆる角度から工具形状の最適化を提案し、その工具形状の開発を実験的に解明することによって、小径ボールエンドミルの深彫り加工法の確立を試みるものである。

第2章では、エンドミルの基本的な切削特性およびそれを左右する因子について述べ、それぞれの因子が小径エンドミルの深彫り加工に及ぼす影響とそれらの問題点を指摘した。

小径ボールエンドミルによる深彫り加工においては、①刃部がシャンク部に対して細くなっているため、首部に応力が集中して折損することがある、②加工中のたわみによって設定寸法に対して削り残しを発生する、③加工中のたわみやびびり振動によってエンドミル軸心の変位が工作物の基準位置とのズレを生じ、加工面性状を悪化させる、等の問題点があることを明確にした。さらに、小径ボールエンドミルの深彫り加工においては、工具の超硬母材の粒径、C<sub>o</sub>含有量の最適化の必要性および高精度加工を行うための問題点についての指摘を行った。

第3章では、小径ボールエンドミルによる深彫り加工を行うために必要なロングネックタイプの工具形状における折損問題について述べ、等価直径の確保と切削時の応力分散の考え方から以下の提案を行った。

①小径ボールエンドミルは、刃部とシャンク部の寸法が異なることから、首部に応力が集中しやすく、切削抵抗によって折損にいたることもあり、首部にアール部を設けることが有効である。

②工具たわみ量は、はりのたわみの計算式からも等価直径に起因することから、大きな等価直径を保つ必要がある。

③首タイプ3の、アール部と直線部からなる首形状が適する。

第4章では、工具突出し量が切削現象に対してどのような影響を及ぼしているのかを実験的に検討した。すなわち、小径ボールエンドミルの突出し量をパラメータにとり、切削中におけるエンドミルの挙動、切削抵抗、切削後の被削材の加工誤差および表面粗さを測定し、加工精度が低下する要因と切削条件の関連性を追求し、以下のことが明らかとなった。

①同一切削条件で切削加工を行う場合、工具突出し量が長くなると工具剛性の低下により実質切込み比率が急激に減少する。

②突出し量を長くすると、固有振動数が極めて低くなるために、びびり振動を発生しやすくなり、仕上げ面性状を劣化させる。

これらのことから、工具突出し量を長くすることに伴って、切削条件の最適化を検討し、さらに工具形状によって工具剛性の低下を補う必要があることを明らかにした。

第5章では、首下長さを固定し、切削加工条件を変化させて切削特性を実験的に検討した。一般に、切削速度が上昇すると一定領域までは工具刃先温度が上昇するため、切削抵抗は増大することが知られている。しかし、切削速度 60m/min 付近から切削抵抗が減少する傾向が見られる。これは実質切込み比率が 60m/min 付近から同様に減少していることより、切削熱の増大によって被削材が軟化したからではなく、エンドミルの回転挙動が不安定になって、工具たわみ量が増大したことに起因するものである。すなわち、本研究のような小径ボールエンドミルを用いた深彫り加工においては、切削速度の設定が重要となり、60~80m/min の切削条件が適している。

第6章では、工具突出し量を一定にし、工具母材である超硬合金の組成を変化させ、工具表面へ成膜するコーティングの薄膜材質の種類を変え、さらに工具剛性に影響を及ぼす首形状を変化させ、それらが加工精度に及ぼす影響について実験的に検討を行った。また、工具たわみを引き起こす要因を明らかにし、小径ボールエンドミルによる深彫り加工に影響を与える性能因子の最適な方向性に対する検討を行った結果、以下の指針を得た。

(1) 切削距離の増大にともなって切削抵抗は比例的に増大するが、超硬母材のC<sub>o</sub>含有量に変化しても切削抵抗には影響を及ぼさない。一方、加工誤差はC<sub>o</sub>含有量に依存しており、工具のたわみ量の抑制効果ではなく、耐摩耗性、つまり工具摩滅量の抑制効果が大きく支配している。超硬母材の粒径が0.6 μmにおいてC<sub>o</sub>含有量8~10%が良好な切削特性を得た。

(2) 工具表面にコーティング薄膜を施した小径ボールエンドミルを用いて深彫り加工を行った結果、TiSiN系コーティング薄膜品はCrSiN系コーティング薄膜品に比べて形状誤差が少ない結果となった。この要因は工具摩滅量がほとんど同じ結果であることから、皮膜硬度の高いTiSiN系のコーティング薄膜品は機械的な特性が向上し、工具のたわみ量の抑制に繋がったと考えられる。

(3) 小径ボールエンドミルの首形状をペンシルネックタイプにすることによって工具剛性が大きくなり、工具たわみ量を抑制することができた。しかしながら、工具剛性の増大によって工具摩耗を抑制することにはつながらなかった。

(4) 小径ボールエンドミルの深彫り加工において、切削距離の増大にともなう加工誤差を抑えるためには、工具摩滅量を抑制することと、工具のたわみ量を抑制することが必要であり、本実験においてその方向性を見いだすことができた。

第7章では、深彫り加工における仕上げ面性状についてびびり振動の観点より検討を行った。すなわち、びびり振動を発生する要因を明確にしてそれに対する対策の検討を行った。さらに、工具摩滅量を定量的に把握し、それをNC加工プログラムへ導入する方法を検討し、それによって深彫り加工における高精度加工を実現した。

その中で、以下の結果を得た。

(1) 小径ボールエンドミルによる深彫り加工において、仕上げ面性状は切削中のびびり振動の影響を大きく受けるが、これは切削中に発生する外周刃部の加工面への接触に起因しており、工具形状をバックドラフト形状にすることが有効であることが明らかとなった。

(2) 最適な工具形状を採用した小径ボールエンドミルを製作し、1パスごとにNC加工プログラムに補正値を代入する新しい補正方法を採用することにより、長時間にわたる高精度加工の実現が証明された。

## 謝 辞

本研究を行うに際して、終始ご懇切なご指導とご教示を賜りました恩師、関西大学工学部北嶋弘一教授に対して深甚なる謝意を捧げます。また論文の執筆に際し、ご指導および御討論を賜った、関西大学工学部の樋口誠宏教授、新家昇教授に対して厚く御礼を申し上げます。

さらに、本研究の機会を与えて下さった日立ツール株式会社の竹内丹相談役、島順彦社長、小杉明常務取締役、南野修司野洲工場長、坂本靖商品開発センター長、株式会社デムスの佐藤重明取締役副社長に対して心より感謝いたします。

本研究は、平成14年から平成17年にわたり、関西大学工学部・機械系学科・生産加工システム研究室において行われたものであり、本研究を進めるうえで実験装置の製作、実験データの収集に協力を頂いた大学院生の上田晃氏・桐山達也氏および研究室の大学院生諸氏と学部学生諸氏に対して御礼を申し上げます。

また、研究用試料の測定、実験データの収集に協力を頂いた日立ツール株式会社商品開発センターの松本有司氏および同センターのメンバーに対して御礼を申し上げます。

最後に、常に精神的な援助を頂いた父母並びに妻；佐恵子，長男；汰一，次男；岳に感謝いたします。



## 学術論文および講演発表

### 学術論文

- (1) Cutting Accuracy of the Small Radius Ball End Mill  
in Deep Precision Machining  
T.Akamatsu, K.Kitajima, A.Ueda, T.Fuji, S.Minamino  
: Key Engineering Materials Vols.257-258(2004)565-570.
- (2) Influence of Material of Small Radius Ball End Mill on Cutting Accuracy  
in Deep Precision Machining(Second Report)  
T.Akamatsu, K.Kitajima, T.Kiriyama, S.Minamino  
: Key Engineering Materials Vols.291-292(2005)471-474.
- (3) 金型深彫り加工用小径ボールエンドミルの開発  
ーびり振動を抑えた深彫り加工の可能性ー  
赤松猛史, 北嶋弘一, 桐山達也, 南野修司, 松本有司  
: 砥粒加工学会誌, 50,2 (2006)33-38.
- (4) 金型深彫り加工用小径ボールエンドミルの開発 第2報  
ーたわみ量と工具摩滅量を考慮した加工法による超高精度加工の実現ー  
赤松猛史, 北嶋弘一, 桐山達也, 松本有司  
: 砥粒加工学会誌(掲載決定済)

### 総説・解説・紀要・その他

- (1) 深彫り加工用エンドミル「エポックディープボール&スクエア」  
赤松猛史: 型技術, 17, 8(2002)68-69.
- (2) 小径深彫り加工用エンドミル「エポックディープボール&スクエア」  
赤松猛史: 機械と工具, 46, 9(2002)70-73.
- (3) 超深彫り加工に対応した高精密金型加工用「エポックペンシルディープボール」  
赤松猛史: 機械と工具, 47, 9(2003)57-59.
- (4) 深彫り加工の常識を変えた「エポックペンシルディープボール」  
赤松猛史: ツールエンジニアリング, 44, 12(2003)62-67.
- (5) 超深彫り加工用エンドミル「エポックペンシルディープボール」  
赤松猛史: 型技術, 19, 8, (2004)10-11.

### 国際会議

- (1) Cutting Accuracy of the Small Radius Ball End Mill  
in Deep Precision Machining  
T.Akamatsu, K.Kitajima, A.Ueda, T.Fuji, S.Minamino  
: 6<sup>th</sup> International Symposium on Advances in Abrasive Technology  
Bristol, ENGLAND(2004)565-570.
- (2) Influence of Material of Small Radius Ball End Mill on Cutting Accuracy  
in Deep Precision Machining(First Report)  
T.Akamatsu, K.Kitajima, A.Ueda, T.Fuji, S.Minamino  
: 7<sup>th</sup> International Symposium on Advances in Abrasive Technology  
Bursa, TURKEY(2004)531-534.
- (3) Influence of Material of Small Radius Ball End Mill on Cutting Accuracy  
in Deep Precision Machining(Second Report)  
T.Akamatsu, K.Kitajima, T.Kiriyama, S.Minamino  
: 8<sup>th</sup> International Symposium on Advances in Abrasive Technology  
Sankt-Peterburg, ROSSIYA(2005)471-474.

## 学会発表

- (1) 小径ボールエンドミルによる金型の深彫り加工に関する研究  
赤松猛史, 北嶋弘一, 上田晃, 南野修司  
: 2002 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2002)206.
- (2) 小径ボールエンドミルによる金型の深彫り加工に関する研究  
—第2報: 首下長さおよび切削速度が実質切込み量に及ぼす影響—  
赤松猛史, 北嶋弘一, 上田晃, 南野修司  
: 2003 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2003)523.
- (3) 小径ボールエンドミル加工における切削加工特性について  
赤松猛史, 北嶋弘一, 上田晃, 南野修司, 坂本靖  
: 精密工学会 2003 年度関西地方定期学術講演会講演論文集(2003)123-124.
- (4) 小径ボールエンドミル加工における加工精度  
赤松猛史, 北嶋弘一, 上田晃, 南野修司, 坂本靖  
: 2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2003)106.
- (5) 小径ボールエンドミルによる金型の深彫り加工の研究  
赤松猛史, 北嶋弘一, 上田晃, 小田一孝, 南野修司, 坂本靖  
: 日本機械学会関西支部第79期定時総会講演会講演論文集,  
No. 44-1(2004)2-3-2-4.
- (6) 小径ボールエンドミルによる金型の深彫り加工に関する研究  
赤松猛史, 北嶋弘一, 桐山達也  
: 精密工学会 2004 年度関西地方定期学術講演会講演論文集(2004)107-108.
- (7) 小径ボールエンドミルによる金型の深彫り加工に関する研究  
—第3報: 工具材質が切削特性に及ぼす影響—  
赤松猛史, 北嶋弘一, 桐山達也  
: 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2004)221-222.
- (8) 金型深彫り加工用小径ボールエンドミルの開発  
赤松猛史, 松本有司, 北嶋弘一, 桐山達也, 川村健太  
: 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(2005)1191-1192.

- (9) 小径ボールエンドミルによる金型の深彫り加工に関する研究

赤松猛史, 北嶋弘一, 桐山達也, 南野修司, 松本有司, 川村健太

: 2005 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集(2005)87-88.

- (10) 金型深彫り加工用小径ボールエンドミルの開発 (第2報)

—たわみ量を考慮した加工法による超高精度加工の実現—

赤松猛史, 松本有司, 北嶋弘一, 桐山達也

: 2006 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集(2006)241-242.

## 特許

- (1) テーパー部を有するエンドミル: 赤松猛史

日本国特許庁, 特許登録, 特許 3711255 号

- (2) 小径ボールエンドミル: 赤松猛史

日本国特許庁, 公開特許公報, 特開 2004-223633



