

プリント配線板の小径ドリル加工に関する研究

2014 年 7 月

佐 藤 崇 弘

目次

第1章 緒論.....	1
1. 1 研究の背景と目的.....	1
1. 1. 1 プリント配線板の歴史と技術動向.....	2
1. 1. 2 プリント配線板の分類と構造.....	3
1. 1. 3 プリント配線板の構成材料.....	5
1. 2 ドリル加工に関する従来の研究.....	6
1. 2. 1 食い付き時のドリル先端の挙動.....	7
1. 2. 2 小径ドリル加工に関する研究.....	8
1. 3 プリント配線板のドリル加工.....	9
1. 3. 1 プリント配線板の加工穴品位.....	9
1. 3. 2 プリント配線板用ドリルの素材.....	10
1. 3. 3 プリント配線板のドリル加工法.....	10
1. 3. 4 エントリーシートについて.....	11
1. 4 本研究の目的と論文の概要.....	12
第2章 プリント配線板のドリル加工特性.....	14
2. 1 緒言.....	14
2. 2 実験方法および実験条件.....	14
2. 2. 1 加工装置.....	14
2. 2. 2 加工現象評価方法.....	16
2. 2. 3 加工穴品位評価方法.....	18
2. 2. 4 実験条件.....	20
2. 3 実験結果および考察.....	20

2. 3. 1	穴加工中の切削力.....	20
2. 3. 2	切りくず排出状況.....	22
2. 3. 3	切りくず形状.....	24
2. 3. 4	工具摩耗に及ぼす切削速度の影響.....	24
2. 3. 5	穴径に及ぼすドリル摩耗量の影響.....	25
2. 3. 6	ドリルの曲がり.....	26
2. 3. 7	穴壁面粗さ.....	27
2. 3. 8	穴壁面粗さに及ぼすドリルコーティングの影響.....	28
2. 3. 9	穴壁面粗さに及ぼす被削材温度の影響.....	30
2. 4	結言.....	32
第3章	プリント配線板の加工特性に及ぼすエントリーシートの影響.....	33
3. 1	緒言.....	33
3. 2	実験方法および実験条件.....	33
3. 3	実験結果および考察.....	35
3. 3. 1	エントリーシートの効果.....	35
3. 3. 2	穴位置精度に及ぼすエントリーシートの表面粗さの影響.....	37
3. 3. 3	加工特性に及ぼすエントリーシートのアルミニウム材料の影響.....	38
3. 3. 4	加工特性に及ぼすエントリーシートのアルミニウム板厚の影響.....	43
3. 4	結言.....	46
第4章	穴位置精度に及ぼすエントリーシート樹脂特性の影響.....	47
4. 1	緒言.....	47
4. 2	実験方法およびエントリーシートの樹脂特性.....	48
4. 2. 1	加工機および実験条件.....	48
4. 2. 2	加工穴品位評価試験方法.....	49

4. 2. 3	加工特性評価試験方法	49
4. 2. 4	エントリーシートの樹脂特性	53
4. 2. 4. 1	エントリーシート樹脂部の硬さ	53
4. 2. 4. 2	エントリーシート樹脂部の熱溶解特性	54
4. 2. 4. 3	エントリーシート樹脂部の潤滑特性	55
4. 3	実験結果および考察	58
4. 3. 1	穴位置精度に及ぼす wax 配合割合の影響	58
4. 3. 2	穴位置精度に及ぼすエントリーシート樹脂材料の影響	60
4. 3. 3	穴位置精度に及ぼす実験条件およびエントリーシート樹脂材料の影響	60
4. 3. 4	エントリーシート加工中の樹脂部表面状態	65
4. 3. 5	エントリーシート加工中のドリル先端挙動	68
4. 3. 6	エントリーシート加工中の切削力	71
4. 4	結言	72
第 5 章	穴壁面粗さに及ぼすエントリーシート樹脂特性の影響	74
5. 1	緒言	74
5. 2	実験方法および実験条件	74
5. 3	実験結果および考察	76
5. 3. 1	穴壁面粗さに及ぼすエントリーシート樹脂材料の影響	76
5. 3. 2	加工後のドリルフルート部	77
5. 3. 3	ドリルフルート部に付着する樹脂の効果	79
5. 3. 4	貫通直後のドリル刃先温度	81
5. 3. 5	エントリーシートの潤滑・冷却性能の持続性	82
5. 3. 6	wax 系樹脂付きエントリーシートの穴壁面粗さの改善	84
5. 3. 6. 1	穴壁面粗さに及ぼす低融点樹脂添加量の影響	84
5. 3. 6. 2	穴壁面粗さに及ぼす樹脂巻付き性の影響	85

5. 4 結言	87
第 6 章 回転振れのある小径ドリルの加工挙動	89
6. 1 緒言	89
6. 2 求心現象	91
6. 3 解析方法および実験方法	93
6. 3. 1 解析方法	93
6. 3. 1. 1 解析モデルおよび解析条件	94
6. 3. 1. 2 メッシュサイズについて	98
6. 3. 2 実験方法	100
6. 4 解析結果および実験結果	101
6. 4. 1 ドリル先端移動軌跡および切削力に及ぼす初期切れ刃向きの影響	101
6. 4. 2 ドリル先端移動軌跡および切削力に及ぼす被削材材料の影響	104
6. 4. 3 求心性に及ぼす送り量の影響	106
6. 4. 4 求心性に及ぼすドリル中心軸の傾きの影響	108
6. 4. 5 求心性に及ぼすドリル先端角の影響	110
6. 4. 6 求心性に及ぼすドリル剛性の影響	111
6. 5 求心性に関する考察	113
6. 5. 1 求心性に及ぼす工具先端形状の影響	113
6. 5. 2 移動抵抗の主軸回転中心方向成分と求心性の関係	116
6. 6 結言	118
第 7 章 結論	119
参考文献	122
関連報告	126
謝辞	128

第 1 章 緒 論

1.1 研究の背景と目的

近年の生活は輸送機器，情報機器，医療機器などの発展にともなって，日々豊かで便利になっている．それらの機器には，小型化や高機能化が求められ，その結果，材料の多様化や搭載する部品の小型化が進み，製造技術・加工技術に高度化・微細化が要求される．その中で，モノづくりの重要な工程の一つである小径穴加工には，よりレベルの高い穴を加工する技術が求められている．

そのような中，穴加工に対して様々な穴加工法が提案されている．最も一般的なドリルを使う切削加工から，レーザを使うエネルギー加工，放電現象を利用する放電加工，金型を使うプレス加工，マスクを使うエッチング加工と多種多様である¹⁻¹⁾．その中でもドリル加工は，生産性と穴品位の両方を満足できる方法である．

ドリルによる切削加工の中には，電子機器に搭載されるプリント配線板の穴加工がある．プリント配線板は通常の金属材料と異なり複合材料であるため，穴加工時に切りくず排出不良などが生じやすい．しかし，あまり研究が進んでいない．プリント配線板の穴加工は，直径 $50\sim 300\mu\text{m}$ ， $L/D=10$ 以上（ L ：穴深さ， D ：穴径）の小径深穴加工で，高速で加工する技術が必要とされている．また，エンジンの燃料噴射ノズル，化繊素材製造用ノズル，医療用機器のノズルなどの製品においても，高精度，高品位，低コスト，小径化の要求がますます高まっている．しかし，小径穴加工は，工具径に対する回転振れの比が大きくなるため，突発的な工具折損や加工精度の悪化などの課題がある．

そこで，本研究ではプリント配線板の穴の高品位化を目的とした小径ドリル加工技術と小径ドリル加工の課題の一つである回転振れについて研究を行った．以下，プリント配線板と小径穴加工の技術動向と近年までの研究内容について述べる．

1.1.1 プリント配線板の歴史と技術動向

プリント配線板（Printed Wiring Boards）とは，電氣的絶縁板の表面または表面とその内部に導電性材料で回路パターンを形成したものであり，定められた機械加工や表面処理を終えた状態，いわゆる電子部品を実装する直前の状態のものを指す．そのプリント配線板に IC(Integrated Circuit) チップなどの電子部品を実装し，はんだ付けしたものがプリント基板（Printed Circuit Boards）と呼ばれるものである．

プリント配線板は，図 1-1 に示すように 1943 年に開発され，現在に至るまで高機能化してきた．その結果，電子機器やモジュールの小型化，高性能化が進んだ．プリント配線板は，身近なところでは携帯電話，パソコン，液晶テレビ，自動車，通信機器などに搭載されている．

プリント配線板は，半導体パッケージや電子部品を実装する基板である

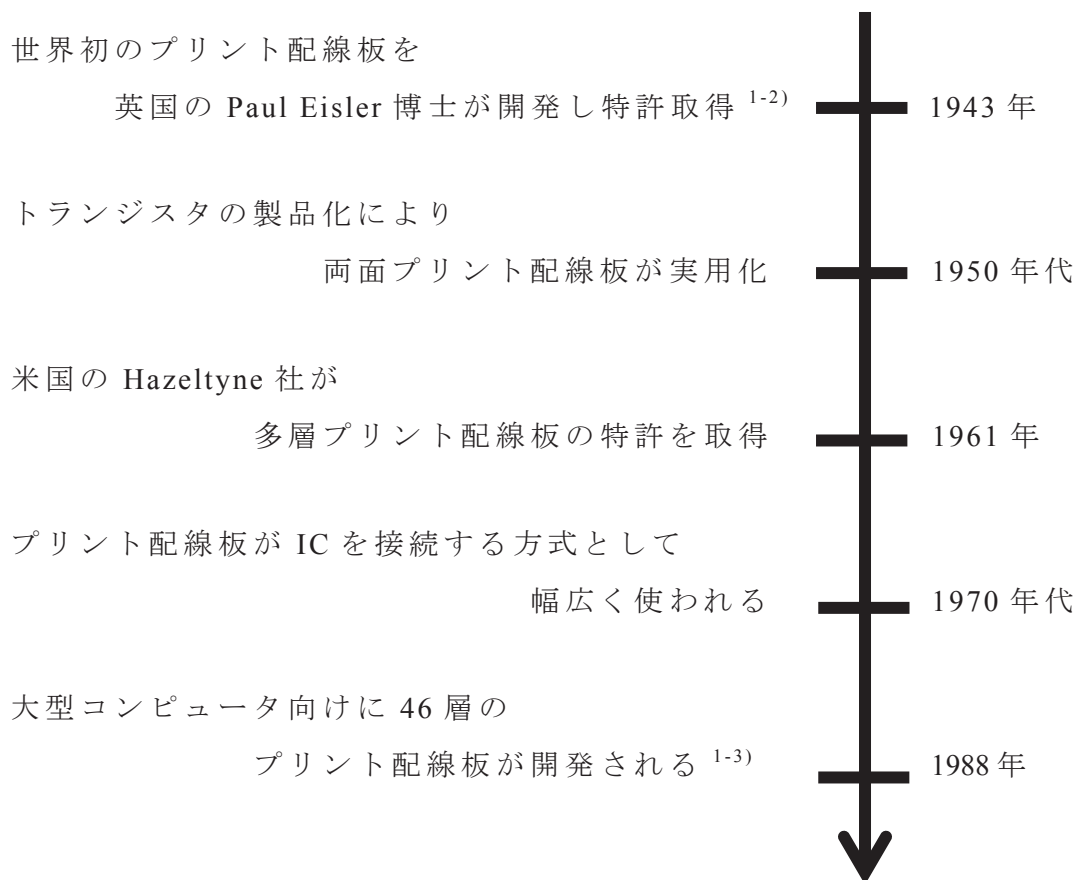


図 1-1 プリント配線板の歴史

ため、プリント配線板の加工技術は、搭載する半導体や電子部品の小型化とともに進歩してきた。最近の半導体パッケージは、狭ピッチの BGA(Ball Grid Array)が主流になっている。電流量の増加や各種インターフェース、データビット数の増加により、今後もさらに配線ワイヤの狭ピッチ化が進むと思われる。また、データ転送速度が今後 5 年間で 10GHz から 20GHz に近づくと見られている。このような高周波域の電気信号は減衰が大きくなるため、伝送特性の良い低誘電率のプリント配線板が開発されている。このように、近年では配線パターンの狭ピッチ化や新しいプリント配線板材料の開発にともない、プリント配線板に高精度に穴あけを行う加工技術が求められている。

1.1.2 プリント配線板の分類と構造

プリント配線板には、絶縁板が曲がりやすいものと曲がりにくいものがある。前者をリジッドプリント配線板、後者をフレキシブルプリント配線板と呼んでいる。

リジッドプリント配線板は、図 1-2 に示すように紙やガラスクロスなどのシートに樹脂を含浸させ、数枚重ねて硬質化したものを絶縁板とし、それに銅箔を貼り付けたものである。通常プリント配線板といえは、リジッドプリント配線板のことであり、市場で多く使用されている。フレキシブルプリント配線板は、ポリエステルフィルムやポリイミドフィルムを絶縁材料としているため、柔軟性が高く、折り曲げたり、ねじったりすることが容易である。フレキシブルプリント配線板は主に携帯電話、デジタル

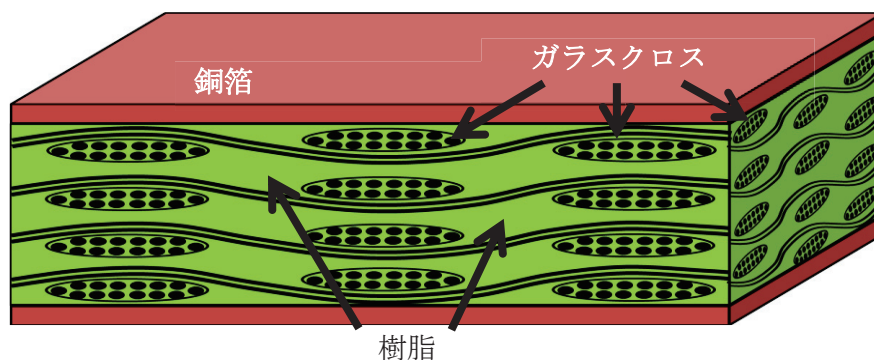


図 1-2 両面プリント配線板の構造

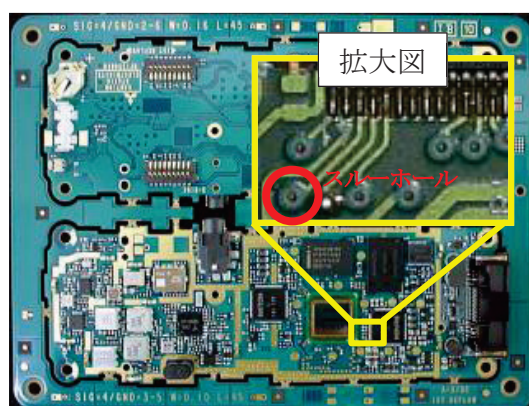


図 1-3 携帯電話のスルーホール

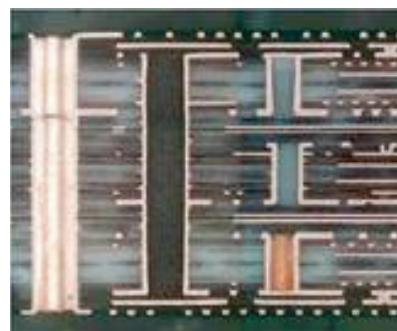


図 1-4 多層板の断面

カメラ、パソコンなどに使用されている．本研究では，フレキシブルプリント配線板と比較して穴壁面粗さの悪化など，技術的な課題の多いリジッドプリント配線板を対象とし，以下この配線板をプリント配線板と呼ぶ．

プリント配線板は，絶縁板の片面のみ銅箔を張り付けた片面プリント配線板，両面に銅箔を張り付けた両面プリント配線板，それを複数枚重ね合わせた多層プリント配線板に分類される．

片面プリント配線板は，片側の銅箔をエッチングで選択的に溶解し，必要な回路パターンを形成する．配線が片面だけであるため，複雑な回路パターンは構成できないが，単純なものを安価につくることができる．

両面プリント配線板は，絶縁板の両面に回路パターンを形成し，両面の配線で立体交差することができるため，片面に比べてより密度の高い配線が可能になる．両面プリント配線板の場合，表裏を電氣的に接続する必要があり，この接続方法としては，金属のジャンパ線で接続する方法，はと目で接続する方法，導電性ペーストで接続する方法，およびめっきで接続する方法があり，近年では図 1-3 に示すように，めっきで接続する方法（めっきスルーホール法）が主流となっている．この方法は，穴の内壁面に導電性の高い銅めっきを施し，表裏の回路パターンを一体で形成する方法で，信頼性が高い．めっきスルーホール法に用いる絶縁板の材料は，めっきと相性の良いものを用いるが，紙基材は不適當で，主にガラス布，またはガラス不織布基材が用いられている．

近年，半導体素子の高集積化により LSI の高性能化や小型化，および部品のリード数の増加によって接続する配線量は飛躍的に増えている．この

ため、絶縁板の両面配線だけではなく、内部にも配線を行う多層プリント配線板（図 1-4）の要求が大きくなっている．多層プリント配線板には、めっきスルーホール多層プリント配線板とビルドアップ多層プリント配線板の 2 種類がある．めっきスルーホール多層プリント配線板の製造工程は、パターンの形成された両面プリント配線板をプリプレグと呼ばれる接着シートで必要数を積層接着し、1 枚の板にする．これに穴をあけ、穴壁面にスルーホールめっきを施す．このようなめっきスルーホール多層プリント配線板は、多層板の基本として広く導入されている．ビルドアップ多層プリント配線板は、コアとなるプリント配線板の上に絶縁層を作り、この表面に回路パターンを形成し、回路パターンと絶縁層を接続するためにビアと呼ばれる微細な穴をあけ、めっきで接続する層を繰り返し積み上げ形成されたものがある．この方式は、ビアの空間を小さくすることにより、ビアの径，ライン幅，間隔の微細化が図れ，高密度配線を可能にする．

1.1.3 プリント配線板の構成材料

プリント配線板は銅箔，ガラスクロス，樹脂で構成されたもので，物性値が大きく異なるものの集まりである．

銅箔には電解銅が用いられ，厚さは $0.005\sim0.070\text{mm}$ 程度で，接着剤により基材に貼り付けられる．ガラスクロスは，図 1-5 に示すように直径 $0.005\sim0.015\text{mm}$ 程度のガラス繊維を数百本よりあわせたヤーンと呼ばれる糸を縦糸と横糸にし，それを織り込んだシート状のものである．主成分

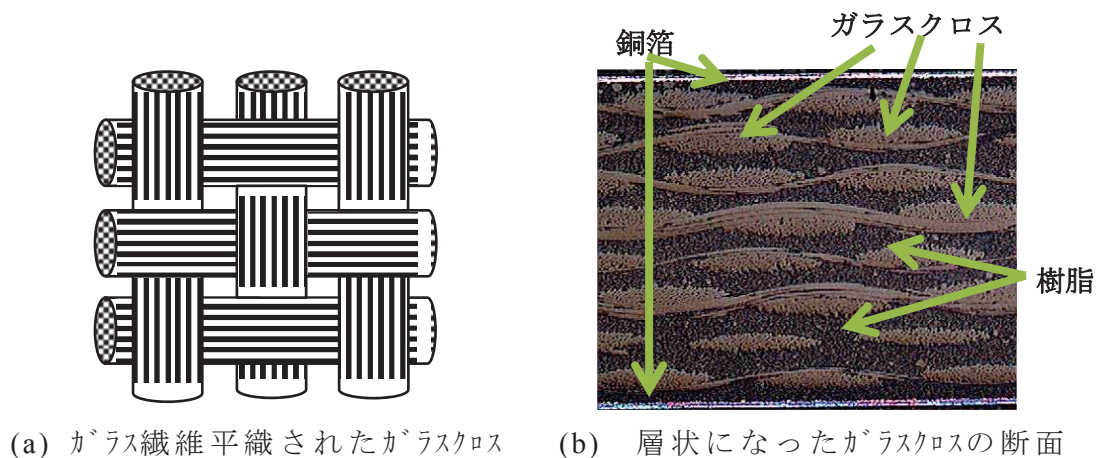


図 1-5 ガラスクロス

はシリカ，アルミナおよびホウ素などを含む鉱石である．プリント配線板には，製造過程中にはんだ付けやめっき工程などがあることから耐熱性や耐薬品性が求められる．そのため，含浸する樹脂には，高温でも電気特性に変化がなく，他の材料との密着性が良好なフェノール樹脂やエポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂が使われている．

近年では，製品の小型化・高性能化にともない，プリント配線板に要求される材料特性が高耐熱性，低熱膨張性および高弾性となっている¹⁻⁴⁾．この要求を満足するためには，樹脂中にシリカや水酸化アルミニウムなどの無機フィラを配合する方法が一般的である．しかし，ガラス繊維やシリカはドリルのアブレシブ摩耗の主要因となり，水酸化アルミニウムや銅箔は切りくず排出不良の要因となる¹⁻⁵⁾ため，被削材の加工性改善が望まれている．

1.2 ドリル加工に関する従来の研究

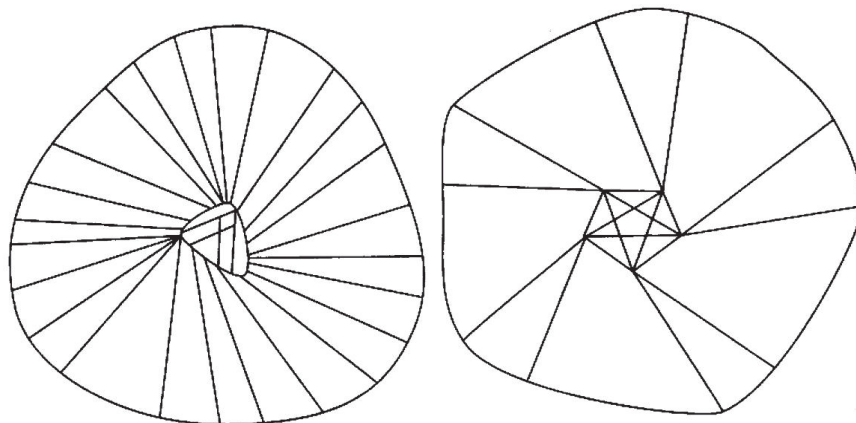
ドリル加工は，主にボール盤，旋盤，フライス盤，マシニングセンタなどにドリルを取付け，回転運動により工作物に穴をあける切削作業のことである．ドリルの形状は，2つの切れ刃をもつねじれドリル（ツイストドリル）が一般的で，主として高速度工具鋼または超硬で作られている．

ドリル先端のチゼルエッジ部では，すくい角が負で，切削速度が0に近く，切削というよりも押し込む状態になるため，加工精度が悪くなりやすい．また，穴が深くなるほど切りくずの排出が困難になり，かつ切削油剤による冷却作用が低下し，工具摩耗や工具折損の原因となることが知られている．このようにドリル加工は，高品位かつ効率的に加工を行うことは難しい場合があるが，多くの部品で必要とされていることから，従来から数多くの研究が報告されている．以下に本論文で対象としているドリル先端の食い付き時における挙動と小径ドリル加工技術全般に関連した研究を述べる．

1.2.1 食い付き時のドリル先端の挙動

ドリル先端が被削材に接触した直後の挙動について、津枝ら¹⁻⁶⁾、藤井ら^{1-7) 1-8)}、佐久間ら¹⁻⁹⁾、加藤ら¹⁻¹⁰⁾、窪田ら¹⁻¹¹⁾など数多くの研究が行われている。これらの研究では、ドリル先端が被削材に食い付いた直後、図1-6に示すような大きな丸みをもった奇数多角形に歩行する現象が発生すると報告されている。歩行現象は、穴の真円度などの加工精度はもとよりライフリングにも影響を及ぼし、深穴加工ともなれば穴の曲がりや工具折損につながりかねない¹⁻¹²⁾。このような歩行現象については、自励振動の一種と見なし、現象解明に向けて研究が進められてきた。その中で、工具先端形状に着目した藤井ら¹⁻⁷⁾および佐久間ら¹⁻⁹⁾の研究では、2つのチゼルエッジのコーナーを回転中心としてドリルが交互に振れまわると説明されている。さらに、歩行現象を抑制するためには、高剛性のドリルで微小送りにする、またはチゼルエッジ長さを長くするなど様々な考察がなされているが、歩行現象の抑制について統一的な見解はなく、未だ不明な点が多い。

一方、近年ドリルの小径化にともないドリル径に対する回転振れの比が大きくなり、加工挙動に及ぼす回転振れの影響が無視できなくなっている。しかし、これらの研究では、回転振れがドリル先端の加工挙動に及ぼす影響は明らかにされていない。そのような中、渡邊ら^{1-13) 1-14)}の研究では、回転振れのあるドリルが被削材に食い付いた直後から徐々にドリル先端



(出典：翁登茂二：機械加工のワンポイントレッスン，でか版技能ブックス⑬，(株)大河出版，(2000),111)

図 1-6 ドリル先端食い付き直後の穴底面

が回転中心に収束していく現象，いわゆる求心現象を高速度カメラで観察している．また，梶田ら¹⁻¹⁵⁾の研究では，ドリルを先端が円錐状の丸棒に置き換え，求心現象について数式モデルを提案し，実験によりその検証を行っている．しかし，実際のドリル先端には切れ刃やチゼルエッジなどが存在しており，これらの影響までは検討されていない．

1.2.2 小径ドリル加工に関する研究

従来から行われてきた小径ドリル加工に関する研究を大別すると，次のようになる．

- ①小径ドリルの加工挙動に関する研究¹⁻¹³⁾¹⁻¹⁶⁾
- ②小径ドリル加工の加工特性に及ぼす被削材の影響^{1-17) 1-18)}
- ③プリント配線板特有の加工現象の解明^{1-5) 1-13) 1-19) 1-20) 1-21) 1-22)}
- ④小径ドリル加工用の加工装置や折損防止システムの開発^{1-23) 1-24) 1-25)}
- ⑤小径ドリルの先端形状や表面改質による穴の高品位化^{1-26) 1-27) 1-28)1-29)}

これらの研究により，小径ドリル加工の技術が進歩し，それにともない市場の要求も高度化，複雑化してきた．

①は，主にスラストやトルクといった切削力を測定することで加工現象の解明を行っているものである．②は，通常の大径ドリルでは影響の少ない被削材結晶粒サイズの影響や母材に影響のない範囲内での材料添加にともなう被削性改善などについて述べている．超高速スピンドル搭載の機械で加工を行う③では，プリント基板特有のガラスクロスの影響の解明や切削力・切削温度計測による穴加工現象の解明などが行われている．また，微細加工を行う上で，加工装置や周辺治具が加工に与える影響は大きい．そのような中で，④の小径ドリル加工用装置の開発も進んでいる．具体的には，小径ドリルの大きな課題の1つである工具折損性改善のための折損防止システムの開発である．これらは，主に切削力をモニタリングすることで異常値になった場合に加工を停止するシステムである．最後に，主に工具メーカーが主体となって研究開発が進められてきた⑤の研究も行なわれている．これらの研究では，小径ドリル加工に適したドリル先端形状が提案されており，近年では $L/D=100$ 程度の穴加工まで行われるようにな

っている。また、小径ドリルの表面改質を行うことで切削性を改善する手法も検討されている。

このように工具折損性の改善，加工精度の向上，穴壁面品位の改善を目的に様々な方面から小径ドリルに関する研究が進められてきた。しかし，最近ではプリント配線板の穴の小径化，新しいプリント配線板材料の開発などによりさらなる研究が必要となっている。

1.3 プリント配線板のドリル加工

1.3.1 プリント配線板の加工穴品位

プリント配線板には，上述のようにスルーホール加工後に導通用のめっき処理が施される。ドリル加工壁面の凹凸が大きい場合，温度変動のある使用環境下では，凹凸が起点となり亀裂が進展する。その結果，断線の原因になる。また，プリント配線板のドリル加工は，生産性向上を目的に複数枚重ねて同時に貫通穴を加工するため，穴深さも深く， L/D が 10～20 にもなり，食い付き時の位置ずれが加工精度に大きく影響を及ぼす。以上のことから，一般的にプリント配線板の加工穴に求められる品位は厳しく，穴位置精度と穴壁面粗さが受注先の仕様書などに規定されている。さらに，1.1.3 項で述べたようにガラス布などの基材に樹脂を含浸した複合材料であるプリント配線板は，切りくずの排出不良，熱伝導率の低い樹脂による切削温度の上昇などが懸念される。特に穴加工時の切削温度が絶縁材料のガラス転移温度である約 200℃を超える場合，穴壁面品位の低下を招く危険性がある。また，工具剛性が低いため，食い付き時の座屈や加工中のドリル曲がり¹⁻¹²⁾などが発生すると加工精度に大きな影響を及ぼす。その対策として，主軸回転速度の高速化，工具の形状やコーティング材の改良，加工用補助シート，いわゆるエントリーシートの高機能化，超音波振動を用いた加工法などが提案されているがそれらのさらなる高度化が求められている。

1.3.2 プリント配線板用ドリルの素材

プリント配線板は電子機器に搭載されることから、穴加工中に切削油を使用できない。そのため、ドリル素材には高温硬さと耐摩耗性に優れた超硬が一般的に用いられる。

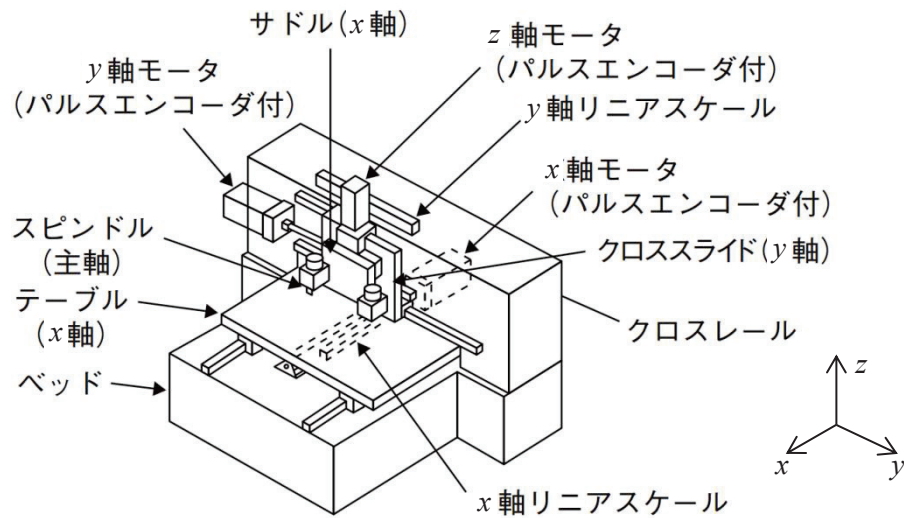
超硬の主な成分は、タングステンカーバイドとコバルトで、必要に応じてチタンカーバイド、タンタル、ニオブが添加される。近年では、タングステンカーバイドの粒子微細化により平均粒径が $0.3\mu\text{m}$ 程度となり、硬さと抗折力の両特性の向上が進んでいる。

1.3.3 プリント配線板のドリル加工法

プリント配線板の穴加工は、一般的に専用加工機で行われている。これは、図 1-7 に示すように NC フライス盤と同じ構造で、ベッドとコラムに取り付けられた 3 軸のサーボモータでテーブルと主軸を動かし、 z 軸にはスピンドルが搭載されている。

最近では、生産効率と加工精度の向上を目的に z 軸のみリニアモータ駆動となっている。さらに、同時に複数の基板を加工できるように 4~6 軸程度の多軸スピンドルヘッドを搭載しているものもある。また高速加工を実現するため、近年では回転速度が毎分約 35 万回転の加工機も販売されている。

一般的な金属加工用の機械と異なる点は、加工法と主軸先端の構造にある。図 1-8 に示すように被削材であるプリント配線板を複数枚重ねた後、その上面にエントリーシートと呼ばれる食い付き性向上を目的にした補助材をセットし、プリント配線板の下面には捨て材としてバックアップボードをセットする。これらの浮きを抑えるため、機械には図 1-9 に示すプレッシャーフットと呼ばれる機構が取り付けられている。これは、図 1-9 に示すように先端ブッシュで被削材を上から下方向に抑えながらドリル加工し、さらに加工中切りくずを集塵機で吸引する構造である。形状の異なる先端ブッシュは、工具径に応じて自動交換できる。



（出典：津坂英夫：特集電子回路基板のドリル・ルータ加工入門，JPCA NEWS March2010）

図 1-7 プリント基板穴加工機の構造

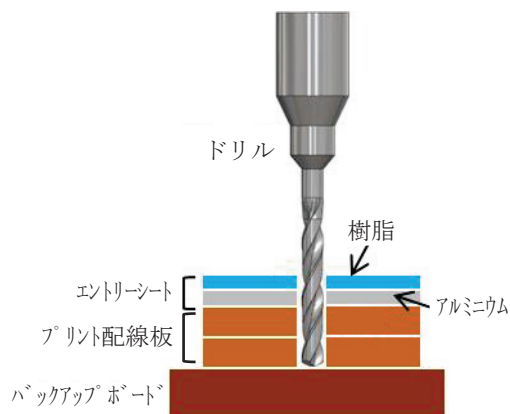


図 1-8 プリント配線板のセッティング

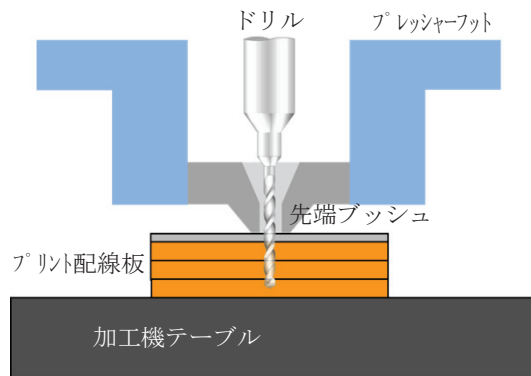


図 1-9 プリント基板加工機の主軸部

1.3.4 エントリーシートについて

エントリーシートに求められる条件は、主に次の 4 点である。

- ① 良好な食い付き性を有すること。
- ② 穴壁面粗さを低減させること。
- ③ 工具寿命を延ばすこと。
- ④ プリント配線板の重ね枚数を増やせること。

エントリーシートは、上述の①～④の条件を満たすために、近年、アルミニウム板の上面に樹脂を塗布したものが普及している。潤滑や冷却の機能をもたせた樹脂は、アルミニウムの切りくずとともにドリルに巻き付き、

切削油と同様の効果を発揮すると考えられている．製造現場では，直径 0.2mm 以下のドリルについて主に樹脂付きエントリーシートが使用されている．

しかし，樹脂付きエントリーシートの樹脂材料に関する系統立てた研究はなく，加工品位に及ぼす樹脂の影響は明らかにされていない．さらに，国内で使用される樹脂は，穴内に残存の可能性が低い水溶性樹脂でなければならないという点から選定される樹脂も限られており，特許の縛りもあることからエントリーシートの開発に遅れが出ている．

1.4 本研究の目的と論文の概要

プリント配線板材料が産業の発展にともない難加工化し，さらに加工される穴の小径化の要望が高まる中で，加工穴の高品位化が求められている．このような要求を満足するためには，ドリル，エントリーシート，工作機械などの高性能化を図るとともに，小径ドリル加工の現象解明が不可欠である．

そこで本研究では，初めにプリント配線板の小径ドリルの加工特性について述べ，その後近年急速に普及している樹脂付きエントリーシートの効果を検証し，樹脂と加工品位の関係について調べている．さらには，加工精度向上を目的に小径ドリルの加工挙動の解明を行っている．特に，食い付き時の加工挙動に及ぼす回転振れの影響を解析と実験から明らかにしている．

以上の内容について，本論文では 7 章に分けて述べており，各章の概要は以下のとおりである．

第 1 章では，緒論として小径ドリルとプリント配線板に関連した技術動向から近年までの研究内容について概括している．また，小径ドリル加工の必要性を示すことで，本研究の背景および目的を述べている．

第 2 章では，プリント配線板のドリル加工特性について，調べている．主に加工中の切削力とドリルの挙動を切削抵抗センサ，高速度カメラを用いて解明し，切削条件が加工後の穴位置精度，穴壁面粗さに及ぼす影響を調べている．

第3章では、アルミニウム製エントリーシートの加工性に及ぼす材料特性の影響を明らかにしている。アルミニウム材料がドリルへの切りくず巻き付き性に及ぼす影響、ドリル食い付き時の切削力に及ぼすアルミニウム材料の影響について調べ、その結果からアルミニウム製エントリーシートの材料特性が加工精度に及ぼす影響について考察している。

第4章では、樹脂付きエントリーシートを用いたプリント配線板穴加工時の穴位置精度に及ぼす樹脂特性の影響を明らかにしている。特性の異なる2種類の樹脂付きエントリーシートとアルミニウム製エントリーシートを用いて、切削抵抗センサ、高速度カメラなどを使って加工中の切削力や切りくず排出性の評価を行うとともに、加工後のプリント配線板の穴位置精度を評価することにより、プリント配線板の穴位置精度に及ぼす樹脂特性の影響について考察している。

第5章では、樹脂付きエントリーシートを用いたプリント配線板穴加工時の穴壁面粗さに及ぼす樹脂特性の影響を明らかにしている。特性の異なる2種類の樹脂付きエントリーシートとアルミニウム製エントリーシートを用いて、加工後のプリント配線板の穴壁面粗さを評価することで、プリント配線板の穴壁面粗さに及ぼす樹脂特性の影響について考察している。

第6章では、プリント配線板用導通穴のさらなる高精度化を目的に、小径ドリル加工の課題の一つである回転振れの発生がドリル食い付き時の挙動に及ぼす影響を明らかにしている。特に、食い付き時の切れ刃の向きにより挙動が異なることを述べている。

第7章は、結論として第2章から第6章までをまとめている。

第2章 プリント配線板のドリル加工特性

2.1 緒言

プリント配線板のドリル加工では、被削材がガラス繊維、樹脂および銅箔を含んだ複合材料であるため、加工現象は一般的な金属のドリル加工と比較して複雑である²⁻¹⁾。そこで本章では、まず高速度カメラを用いた切りくずの排出状況の観察と切削抵抗センサを用いた切削力測定を行うことで、プリント配線板の加工特性を調べた。つぎに、加工後の穴位置精度や穴壁面粗さを測定することで、加工穴特性に及ぼす実験条件などの影響を明らかにした。

2.2 実験方法および実験条件

2.2.1 加工装置

実験に使用した加工機は、プリント配線板穴加工専用機（日立ビアメカニクス(株)：ND-1V211）であり、図 2-1(a)に示すようにパソコンによる制御部と機械部に分かれている。また、図 2-1(b) に示すように、加工機は自動工具交換装置による工具の自動交換が行え、一般の工作機械と同様

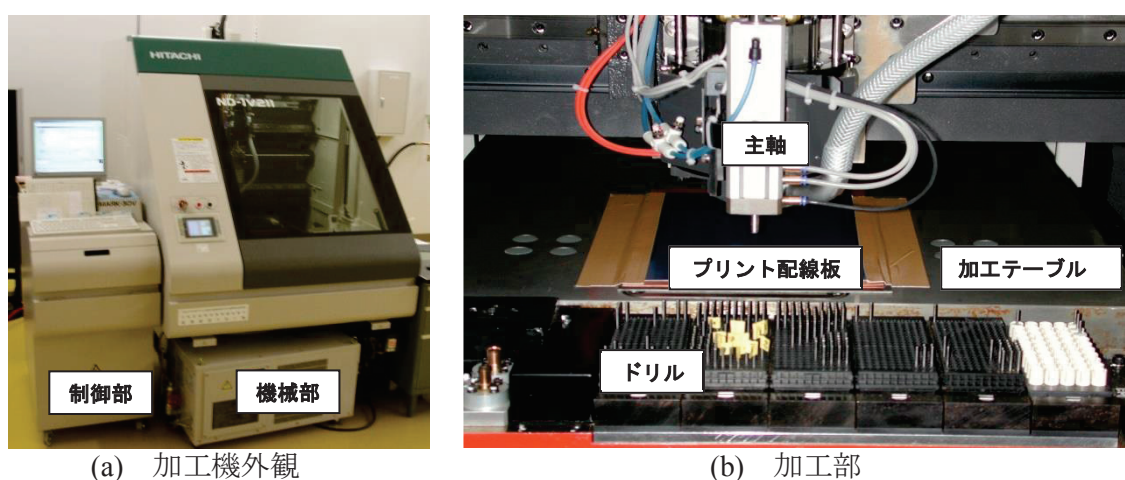


図 2-1 プリント配線板穴加工機

表 2-1 プリント配線板穴加工機の仕様

加工範囲	690mm×535mm
CNC 装置	H・MARK30
XY 軸早送り速度	50,000 mm/min
Z 軸送り速度	101～12,700 mm/min
Z 軸上昇速度	101～25,400 mm/min
XY 軸位置決め分解能	0.0005 mm
XY 軸位置決め精度	±0.005 mm
主軸回転速度	30,000～300,000 min ⁻¹
使用ドリル径	0.1～6.35 mm

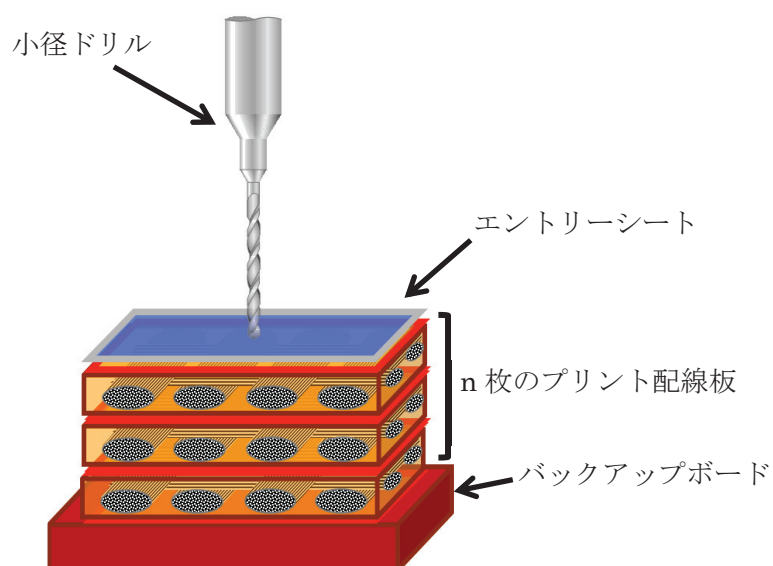


図 2-2 プリント配線板の穴加工法

に加工テーブル上に被削材をセットし、主軸で工具を回転させることで穴あけを行う。

なお、加工機の x および y 軸は、ボールねじによるサーボモータ駆動で、 z 軸のみ生産性向上のためリニアモータ駆動である。主軸には、最高回転速度 $300,000\text{min}^{-1}$ のブラシレス DC モータが搭載されており、焼付き防止と熱変位抑制の目的でスピンドルの筐体が冷却されている。表 2-1 は、加工機の仕様を示す。

図 2-2 は、プリント配線板に穴加工を行う場合のセッティング方法を示

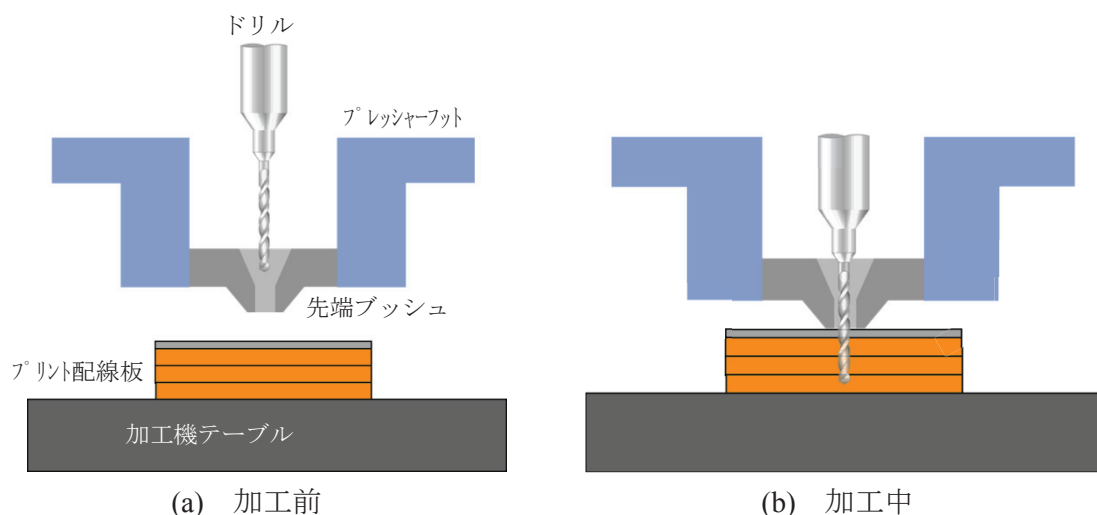


図 2-3 プレッシャーフットを用いた穴加工

している．プリント配線板の穴加工は，1.3.3 項で述べたように生産性向上のためプリント配線板を複数枚重ね，最上面にアルミニウム製のエンタリーシートと呼ばれる加工用補助シートをのせ，最下面に捨て板としてベークライト製のバックアップボードをセットして加工される²⁻²⁾．被削材は，プリント配線板の両端 2 箇所テーブル上にボルト固定されている．なお，一般にプレッシャーフットと呼ばれる被削材浮き上がり防止装置を使って加工する．図 2-3 は，プレッシャーフットを用いた穴加工を示している．加工前は，図 2-3 (a)のようにプレッシャーフットがプリント配線板から浮いている状態であり，加工を行う際にプレッシャーフットの先端にあるブッシュが被削材を上から押さえつけ，そのブッシュの穴から回転したドリルが出てくる構造になっている（図 2-3(b)）．また，プレッシャーフットは集塵機とつながっているため，加工しながら切りくずを吸引することが可能である．

2.2.2 加工現象評価方法

プリント配線板の穴加工は，ドリルが小径でかつ上述のようにプレッシャーフットで覆われるため，加工中の現象を直接，視覚的に把握することが困難である．そこで，加工現象を評価するため，切削抵抗センサによる加工中の切削力測定と，高速度カメラによる切りくず排出状況の観察を行った．

図 2-4(a)は、切削力測定の流れを示す。なお、プリント配線板は図 2-4(b)に示す切削抵抗センサ上にセットされて穴加工が行われる。切削抵抗センサは、xyz 方向の 3 成分(㈱日本キスラー製：プレスフォースセンサ 9317B)とトルク（㈱日本キスラー製：リアクショントルクセンサ 9329A）を計測できる圧電素子タイプのものである。測定は、力の変化により生じた電位差をアンプで増幅し、それをレコーダで記録する方法とした。

穴内における切りくず排出状況は、プリント配線板が透明でないため観察できない。そこで、図 2-5 に示すように、無色透明な PET 樹脂をプリ

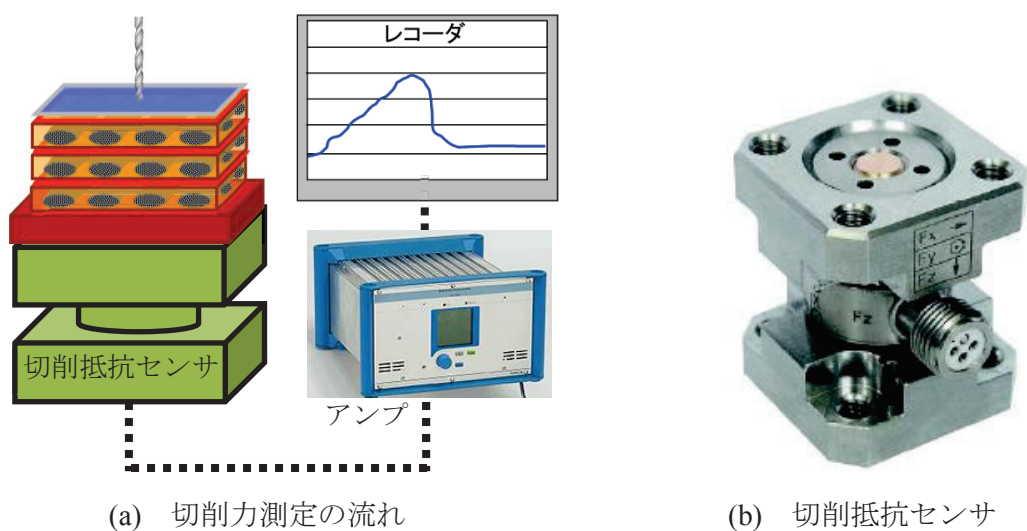


図 2-4 切削力の測定

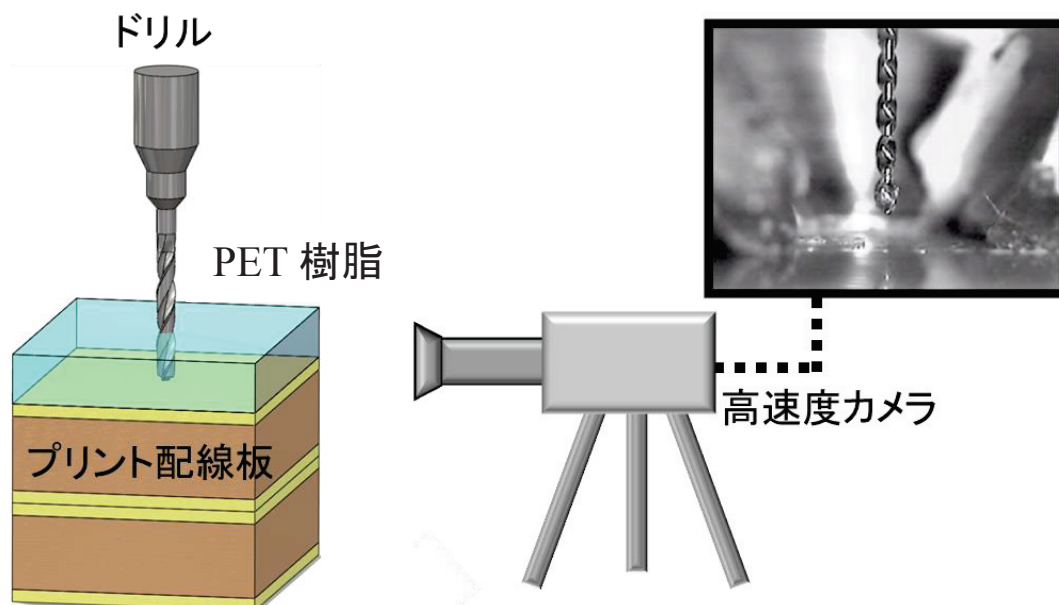


図 2-5 高速度カメラによる切りくず排出状況の撮影方法

表 2-2 高速度カメラの撮影条件

フレームレート	8000 コマ／s
シャッタースピード	20 μ s
トリガ	センタトリガ
光源	メタルハライドランプ 2 灯

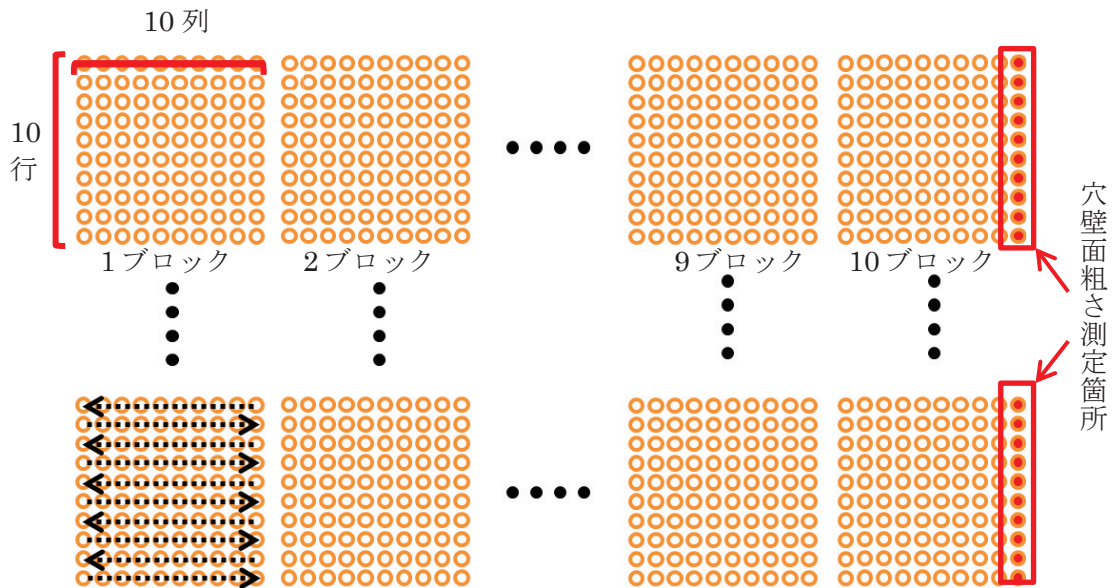


図 2-6 加工プログラムおよび加工穴品位評価箇所

ント配線板の最上面に敷き，穴加工する状況を PET 樹脂側面から高速度カメラ（(株)ナック製：MEMRECAM fx-K5）で撮影した．なお，PET 樹脂はプリント配線板樹脂部と同等のガラス転移点（以下， T_g ）をもつものとした．表 2-2 は，高速度カメラの撮影条件を示す．

2.2.3 加工穴品位評価方法

加工穴品位評価試験は，図 2-6 に示す 10 行×10 列の 100 穴加工を 1 つのブロックとし，それを 10 ブロックの計 1000 穴加工を定ピッチで行い，全数の穴位置精度測定と図中赤丸印の 1000 穴ごとの穴壁面粗さ測定を行った．

穴位置は，CNC 画像測定機（(株)ニコンインステック製：NEXIV VM-250）で穴のエッジを光の明暗により 180 点検出し，その中心座標とした．穴壁面粗さについては，図 2-7 に示すように加工後のプリント配線板を穴中心

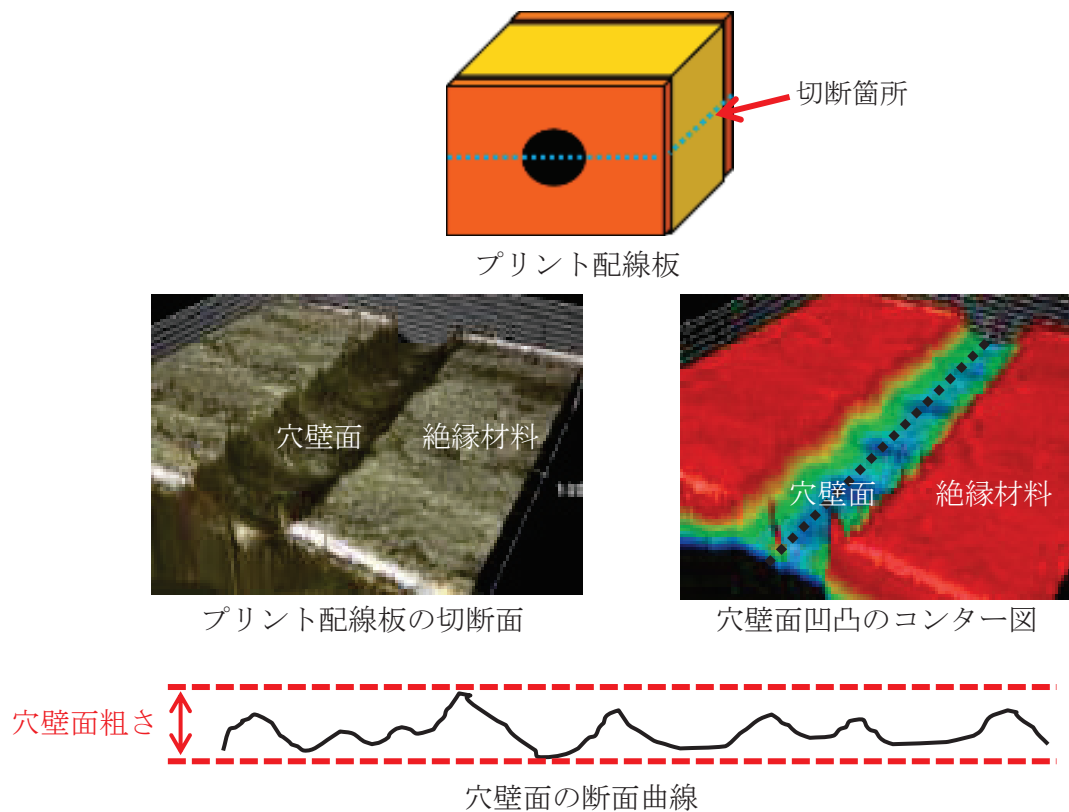


図 2-7 スルーホール穴壁面粗さ評価法

表 2-3 実験条件

	実験条件①	実験条件②
ドリル	工具径 $\phi 0.3$ 刃長 5mm	工具径 $\phi 0.15$ 刃長 2.5mm
プリント配線板	日立化成工業製 型番：MCL-E-67 銅箔 35 μm ，絶縁材 1.0mm 重ね枚数 3 枚	日立化成工業製 型番：MCL-E-679F 銅箔 18 μm ，絶縁材 1.0mm 重ね枚数 2 枚
エントリーシート	アルミニウム(A1050-H18) アルミニウム厚 0.15mm	アルミニウム合金 (A3003-H18) アルミニウム厚 0.12mm 樹脂厚 0.04mm
回転速度	160,000 min^{-1}	300,000 min^{-1}
送り量	19 $\mu\text{m}/\text{rev}$	8 $\mu\text{m}/\text{rev}$

まで半径方向に切断し，研磨後，半円筒部分をレーザ顕微鏡（櫛キーエンス製：VK-9510）で 3 次元的に非接触測定した．なお，穴壁面粗さは穴の半円筒部分を高さ方向のコンター図で評価する方法と，穴底面の一断面（図中コンター図内の点線部）のみ断面曲線の Peak-to-peak で評価する方法の 2 つとした．

2.2.4 実験条件

実験は，アルミニウム製のエントリーシートを用いた実験条件と樹脂付きエントリーシートを用いた場合で行った．ドリル径はアルミニウム製エントリーシートの場合を $\phi 0.3$ ，樹脂付きエントリーシートの場合を $\phi 0.15$ とした．前者を実験条件①，後者を実験条件②と呼ぶ．表 2-3 に実験条件の詳細を示す．なお，各条件は工具メーカーの推奨条件である²⁻³⁾．

2.3 実験結果および考察

2.3.1 穴加工中の切削力

被削材は，絶縁部にガラスクロス層と樹脂層のある両面銅箔付きプリント配線板とした．図 2-8 は，被削材の模式図を示す．絶縁部には，図 2-8(a)に示す平織り状のガラス繊維の束を 4 層重ね，それに図 2-8(b)に示すようにエポキシ樹脂を主原料とする樹脂が充填されている．

実験は，図 2-9 に示すように上からエントリーシート，2 枚のプリント配線板，バックアップボードの順に重ね，プリント配線板の重ね枚数以外は表 2-3 の実験条件①で加工した．その場合のドリルに作用するスラストとトルクの計測を行った．なお，測定データに 3kHz のローパスフィルタをかけることで切削力波形に影響のない範囲のノイズを除去した．図 2-9 より，スラストはエントリーシートの下にある 1 枚目上層の銅箔で最も大きくなり，絶縁部加工時の 4 ヶ所で上昇している．これはガラスクロスを加工することによるものと考えられる．トルクはバックアップボード上面にある 2 枚目以降で振動振幅が増大し，2 枚目下層の銅箔で最も大きくなっている．これらのトルクの変動や増加は，穴が深くなり切りくずの排

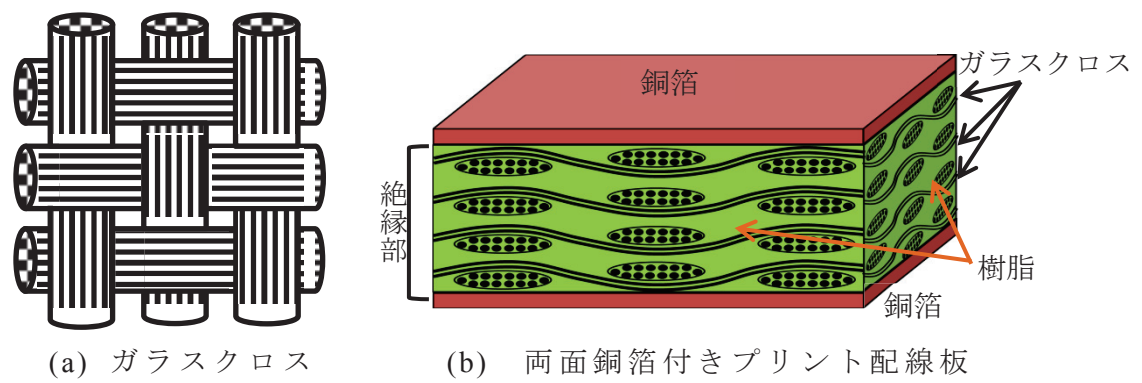


図 2-8 実験に使ったプリント配線板

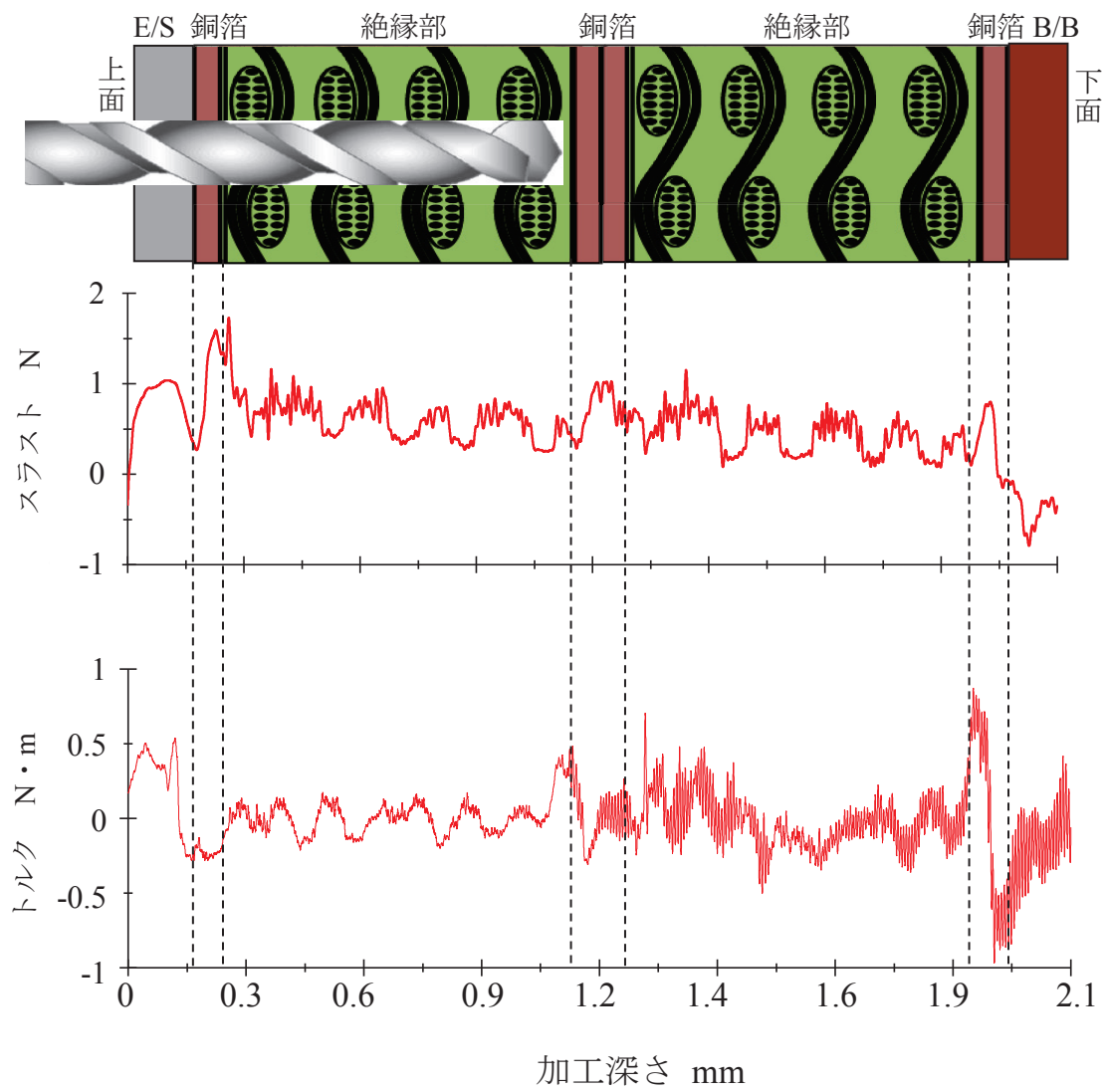


図 2-9 穴加工中のスラストとトルク

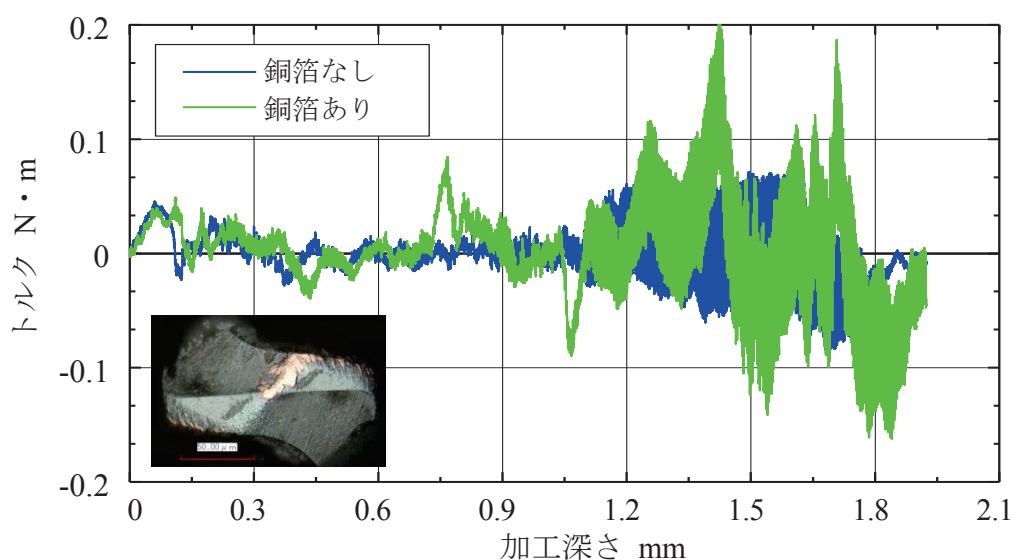


図 2-10 トルクに及ぼす銅箔の影響

出不良が生じた結果と考えられる。

図 2-9 の結果から、切削力に及ぼす銅箔の切りくずの影響が大きいことがわかった。そこで、その詳細を調べるため、プリント配線板の銅箔部のみをエッチングにより除去したもの（以下、銅箔なしと呼ぶ）と通常の両面銅箔付きプリント配線板（以下、銅箔ありと呼ぶ）の加工特性の違いについて調べた。実験条件は②で、トルクを比較した結果を図 2-10 に示す。なお、加工に使用したドリルは、図中に示す 2000 穴加工後の摩耗したドリルである。図 2-10 より、被削材が銅箔なしの場合、トルクは穴の深さとともに徐々に増大していることがわかる。一方、被削材が銅箔ありの場合、銅箔なしではみられなかった大きな変動が加工深さ約 1mm以降の 2 層目で発生した。加工深さ約 1mmより前の 1 層目の銅箔で大きなトルクが検出されなかったことから、トルクの大きな変動は銅箔の切りくず排出不良によるものと考えられる。

2.3.2 切りくず排出状況

プリント配線板穴加工時の穴内での切りくず排出状況を観察した。図 2-11 は、銅箔ありと銅箔なしを図 2-5 で説明した方法で透明な PET 樹脂側面より撮影した写真を示す。図 2-11 より、銅箔なしを加工した場合、切りくずが詰まっているものの内壁粗さへの影響は少ないが、銅箔ありは

銅箔の切りくずが内壁を粗くしている様子がわかる。銅箔ありを加工する状況を高速カメラで撮影した動画で確認すると、穴内で詰まった絶縁材料の切りくずを銅箔の切りくずが押し上げようとして穴壁面を荒らしていることがわかった。このことが、前項で述べた大きなトルク変動発生理由と考えられる。また、銅箔の切りくずは絶縁材料の切りくずと比較して切削温度が上昇しやすいため、高温になった銅箔の切りくずが穴壁面にダメージを与えたものと考えられる。

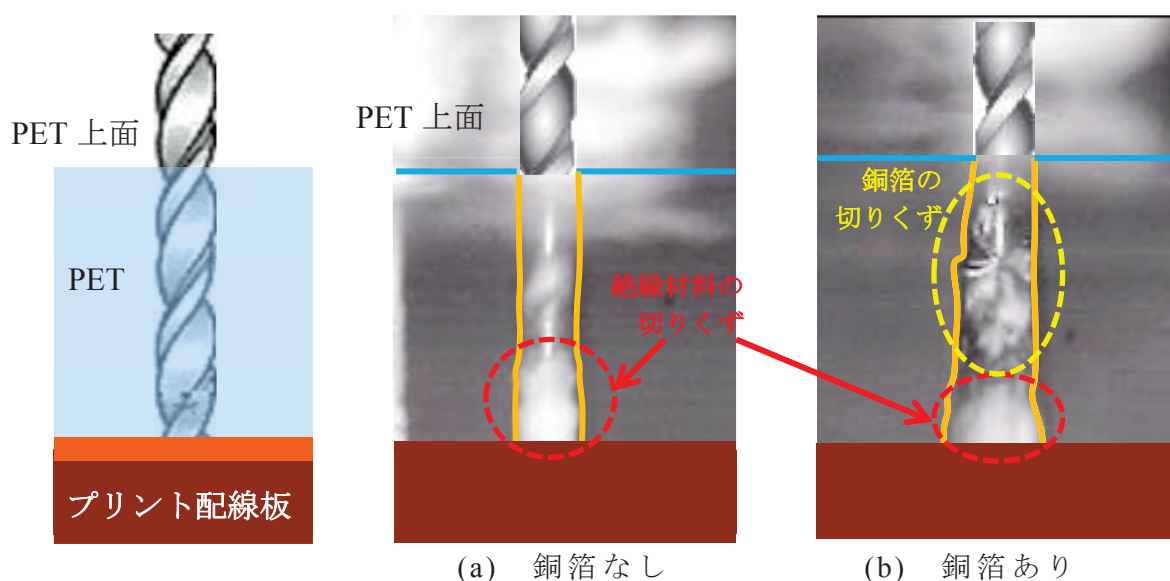


図 2-11 切りくず排出状況

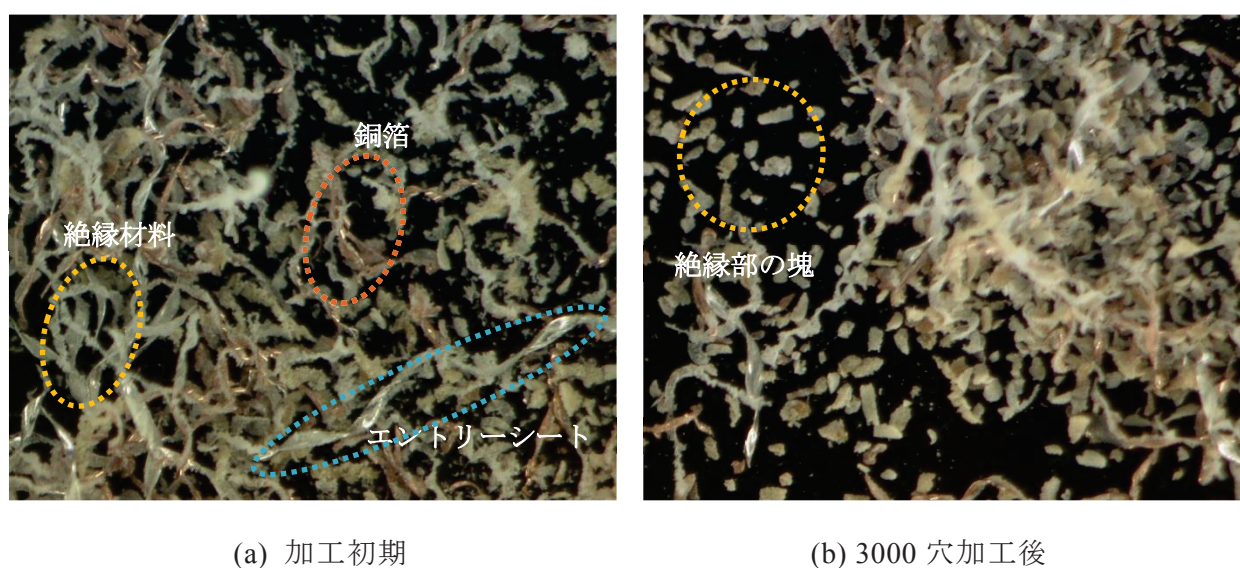


図 2-12 プリント配線板の切りくず

2.3.3 切りくず形状

プレッシャーフットと吸塵機間のホース内にフィルタを設置し、吸引時に吸い上げられた切りくずを採取した。切りくずは、実験条件①で行った場合の加工初期と 3000 穴加工後のものである。切りくずを図 2-12 に示す。図 2-12 より、加工初期はアルミニウムのエンタリーシート、銅箔、絶縁材料のらせん状切りくずが確認できる。しかし、3000 穴加工後の切りくずでは、絶縁材料の切りくずが小さな塊となっていることが確認できる。これは、ドリル摩耗により切削性が悪化し、その結果、前項で示した切りくず詰りにより、穴内で切りくずの形態が変化したものと考えられる。

2.3.4 工具摩耗に及ぼす切削速度の影響

図 2-13 は、プリント配線板穴加工時における切削速度とドリル逃げ面摩耗幅の関係を示す。なお、実験条件は図中の条件とし、1 回転当たりの送り量は固定している。図 2-13 から、切削速度 $V=185\text{m/min}$ が最も逃げ面摩耗幅が小さくなっており、実験を行った範囲では逃げ面摩耗に対して最

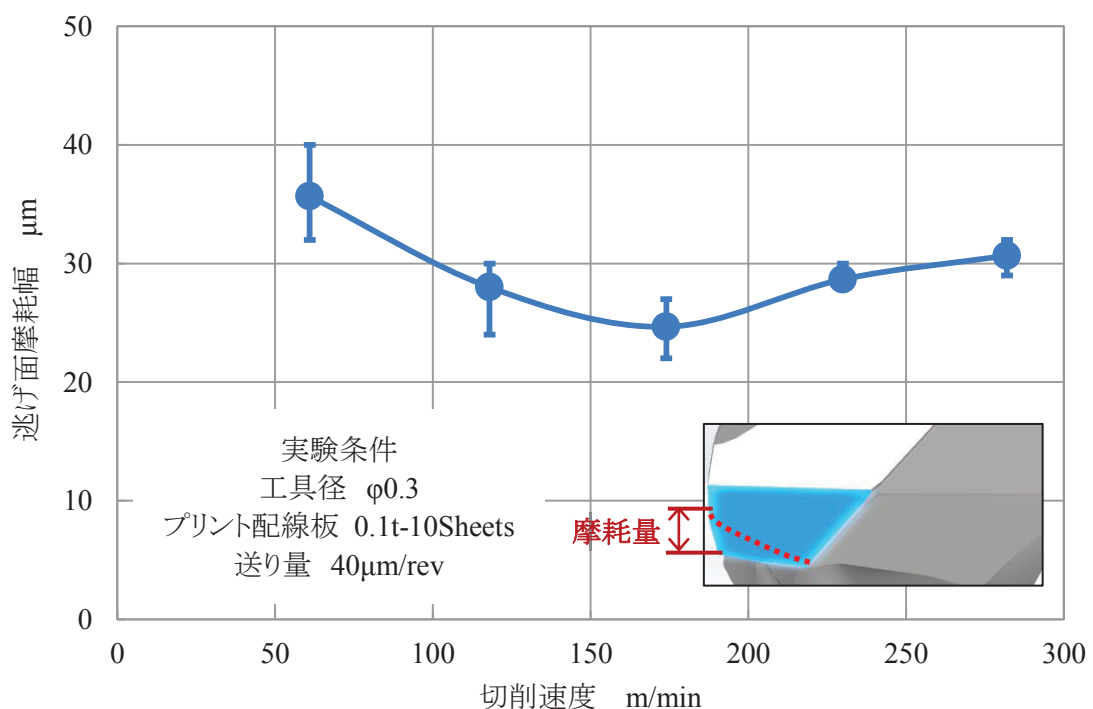


図 2-13 工具摩耗と切削速度の関係

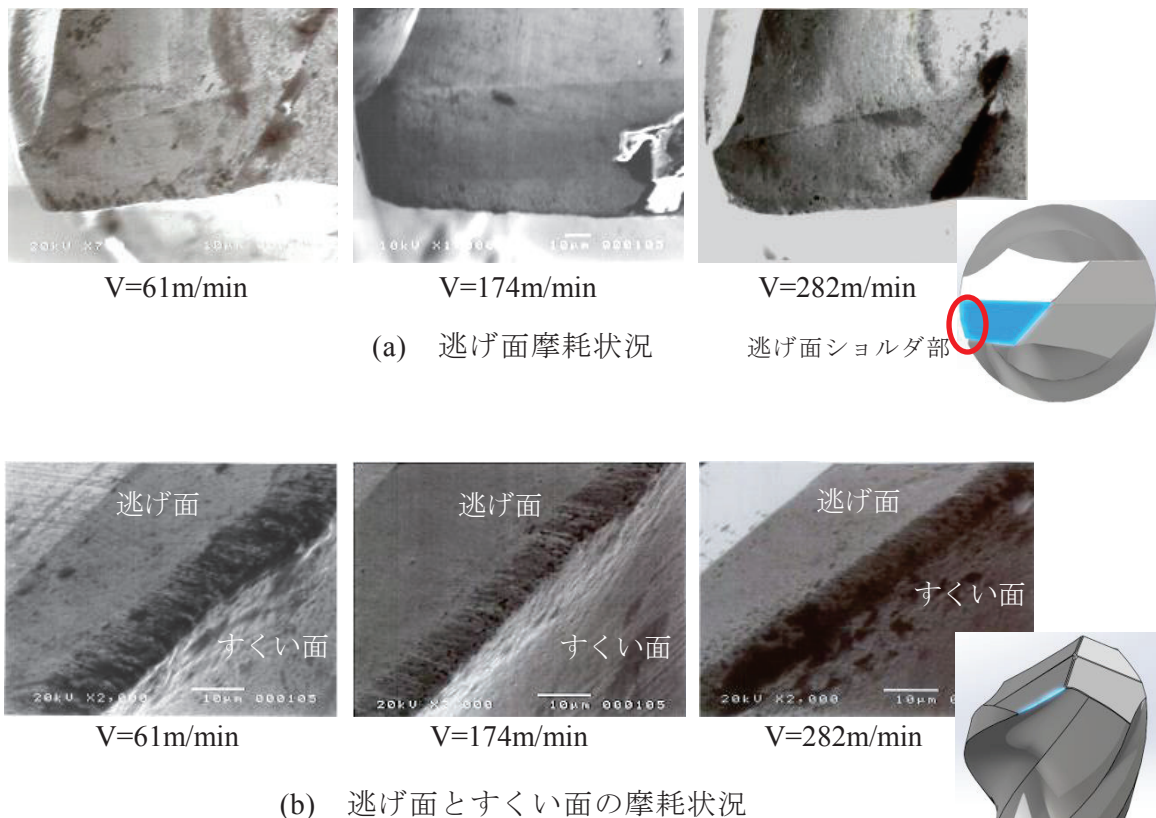


図 2-14 各切削速度におけるドリル摩耗の様子

適な切削速度といえる．図 2-14 は，ドリル逃げ面の摩耗状態を電子顕微鏡（(株)日立ハイテク製: S-3500H）で観察した写真を示す．なお，工具摩耗の観察箇所は図中に示したドリルモデルの青色部である．図 2-14 より，逃げ面ショルダ部の摩耗量は， $V=61\text{m/min}$ の低切削速度で小さく， $V=282\text{m/min}$ の高切削速度で大きい．また，摩耗の形態にも変化が見られる． $V=61\text{m/min}$ の低切削速度では，ガラス繊維の切削による微小なチッピングの累積により摩耗が進行している．一方， $V=282\text{m/min}$ の高切削速度では，アブレイシブなすきとり摩耗により進行している．

2.3.5 穴径に及ぼすドリル摩耗量の影響

図 2-15 は，実験条件①で 10000 穴加工した後，ドリルショルダ部の摩耗量と加工穴の穴径を計測した結果を示す．図 2-15 より，ショルダ部の摩耗は 500 穴まで初期摩耗であり，その後比較的ゆるい傾きで摩耗が進行しており，定常摩耗領域に入っていることがわかる．それに対し穴径は，

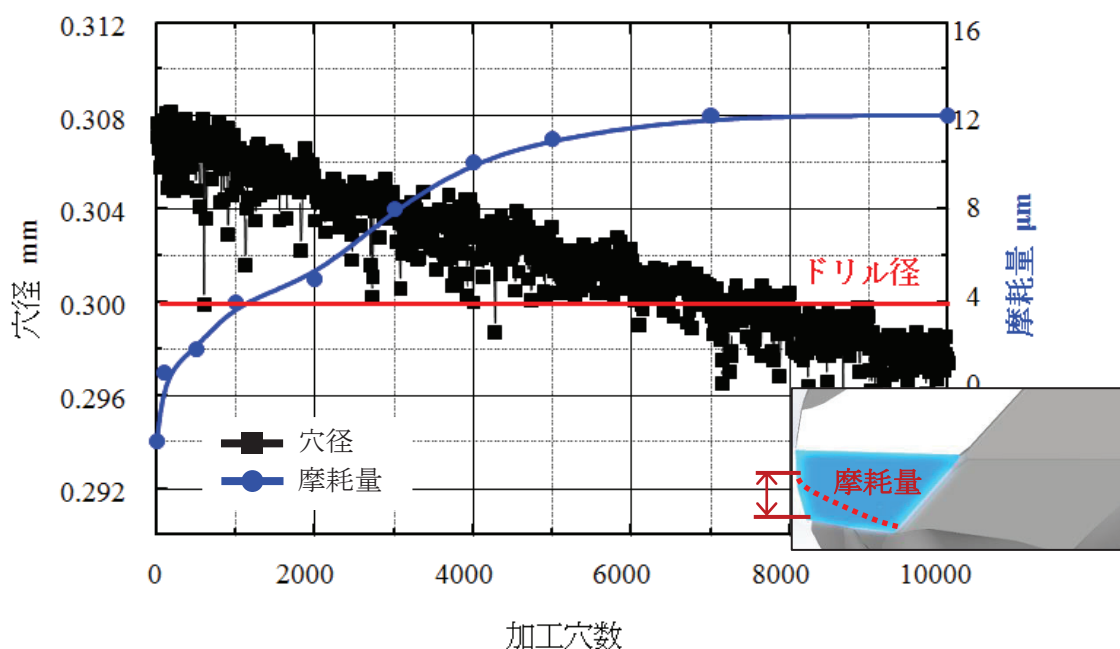


図 2-15 穴径とドリル摩耗量の関係

加工初期で回転振れなどの影響により 0.308mm と大きく、その後、直線的に小さくなっている。今回計測したショルダ部の摩耗が穴径に影響を及ぼすことがわかった。

2.3.6 ドリルの曲がり

実験条件①で 10000 穴の加工を行った際、プリント配線板 1 枚目、2 枚目、3 枚目の同じ箇所の穴位置精度を測定した。なお、3 枚のそれぞれの基準となる穴を $\phi 3$, 工具長 3mm の高剛性ドリルで 2 か所ステップ加工し、その穴で座標系を作成後、それぞれのプリント配線板のプログラム値からのずれ量を計測した。図 2-16 は、プリント配線板各層での穴位置精度を示す。図 2-16 より、重ねたプリント配線板の 1 枚目は穴位置精度が良好であり、2 枚目、3 枚目となるにともない、精度が徐々に悪化している。1 枚目、2 枚目、3 枚目の穴位置のずれは、ドリルの曲がりに対応しているものと考えられる。また、この結果より、ドリルの曲がり方が線形でないことがわかる。これは、加工中に絶縁材料内のガラスクロス粗密、切削力のアンバランスおよび切りくず詰りにより、非線形的なドリルの曲がりが生じたためと考えられる。また、穴位置精度は加工穴数の増加にともな

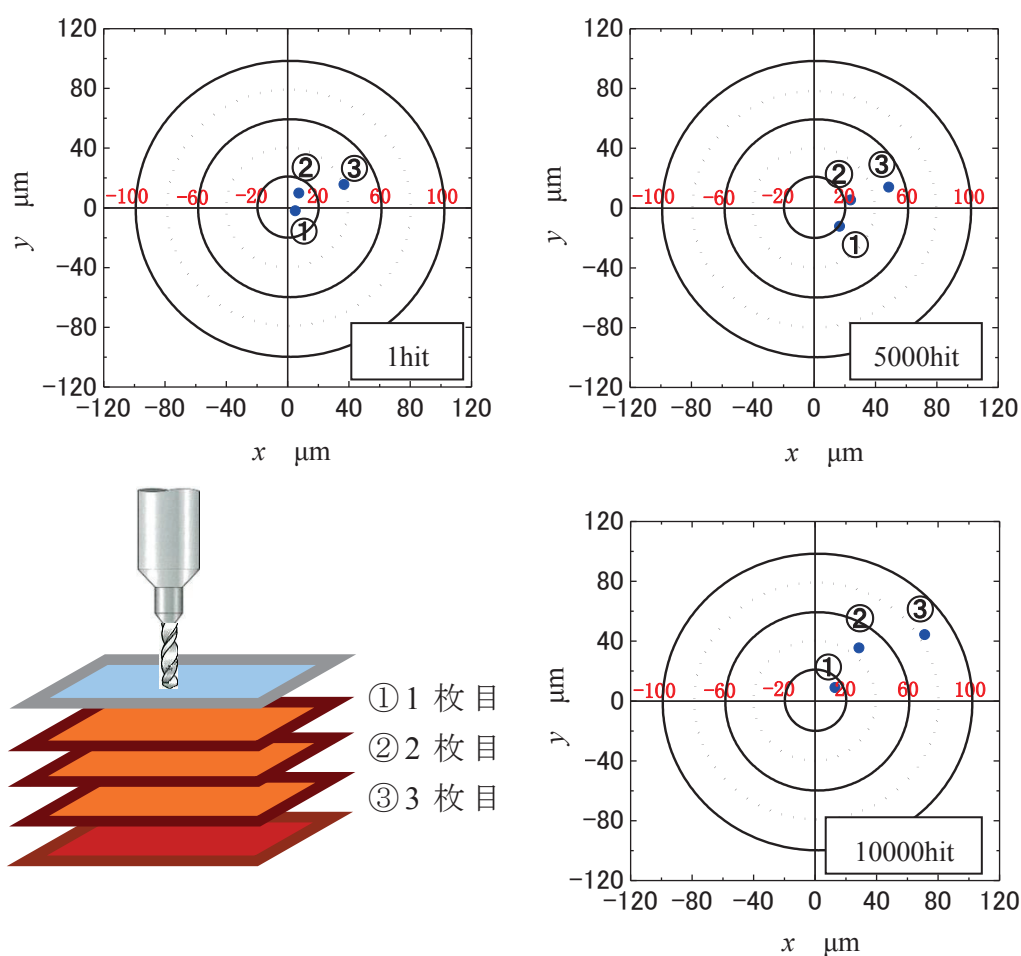


図 2-16 プリント配線板各層での穴位置精度

い悪化している．これは，穴加工数の増加にともなうドリル摩耗の進行が，穴曲がり量に影響したものと考えられる．

2.3.7 穴壁面粗さ

実験条件①で 3000 穴加工後，プリント配線板の穴壁面に銅めっきを施し，樹脂に埋め込んだ状態で半径方向に穴中心まで研磨する．図 2-17 は，その穴断面のエッジを観察した写真を示す．なお，図の左側がドリル入口側（プリント配線板の上面）で，右側が出口側（プリント配線板の下面）である．図 2-17 より，1 枚目および 2 枚目のプリント配線板の穴壁面がくぼんでおり，下面に近づくほどくぼみが小さくなっている．2.3.2 項で観察した結果から，このようなくぼみは，より多くの銅箔の切りくずが通過する 1 枚目と 2 枚目のプリント配線板において切りくず詰りにより発生

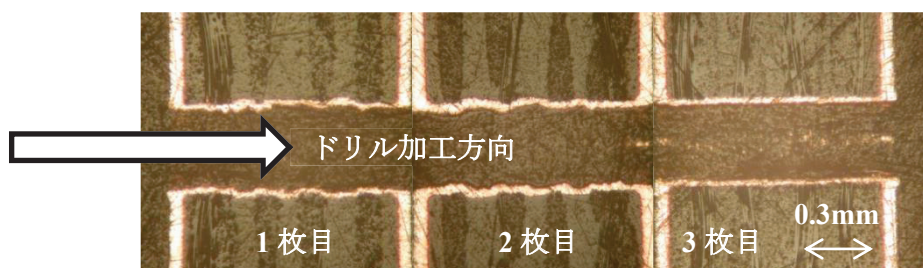


図 2-17 プリント配線板の加工後の穴断面

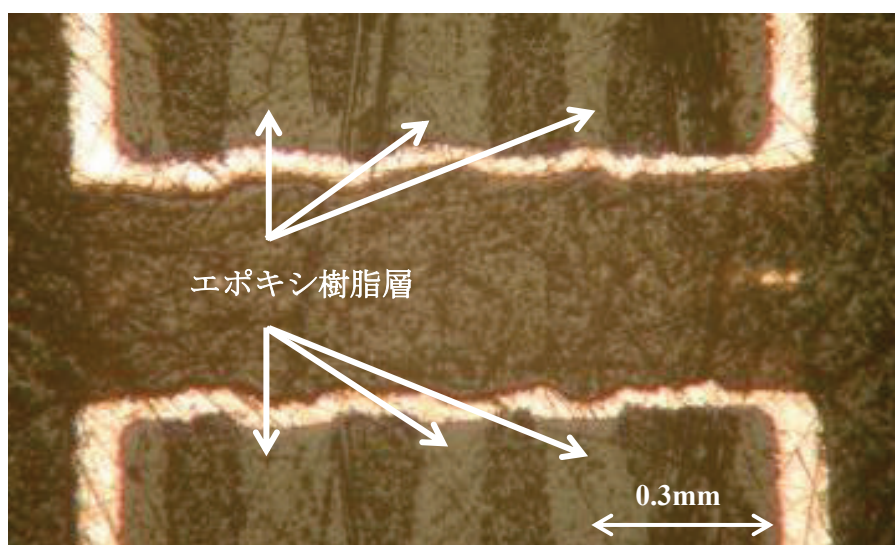


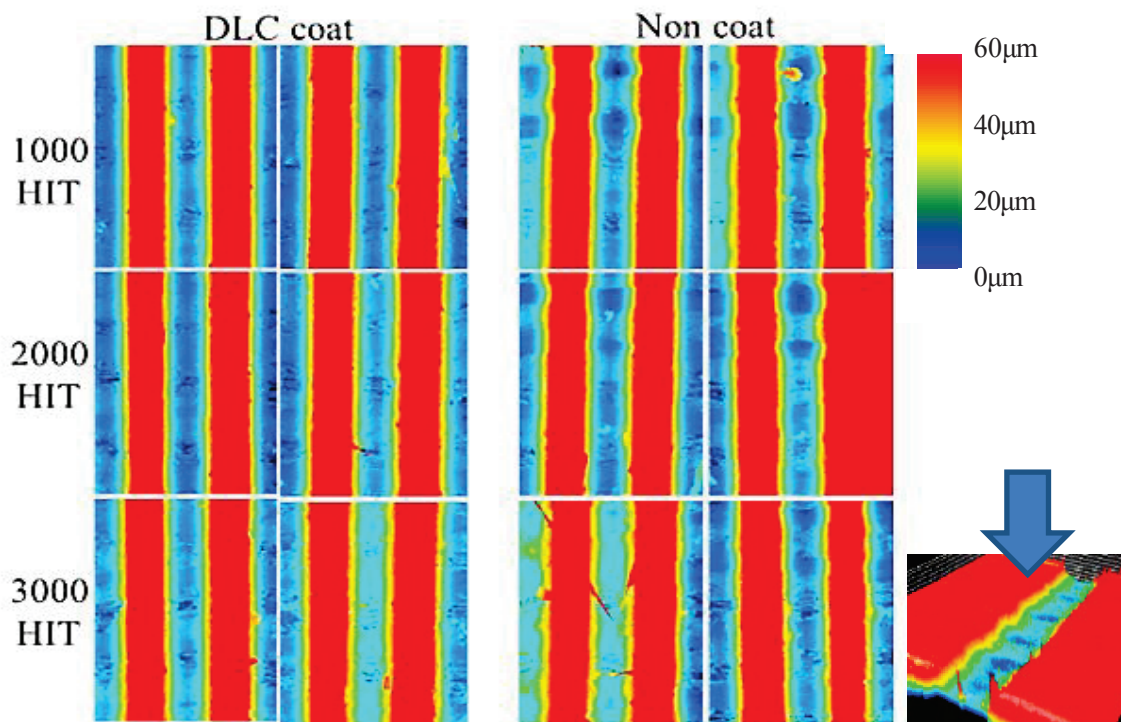
図 2-18 2 枚目のプリント配線板加工後の断面

したものと考えられる。

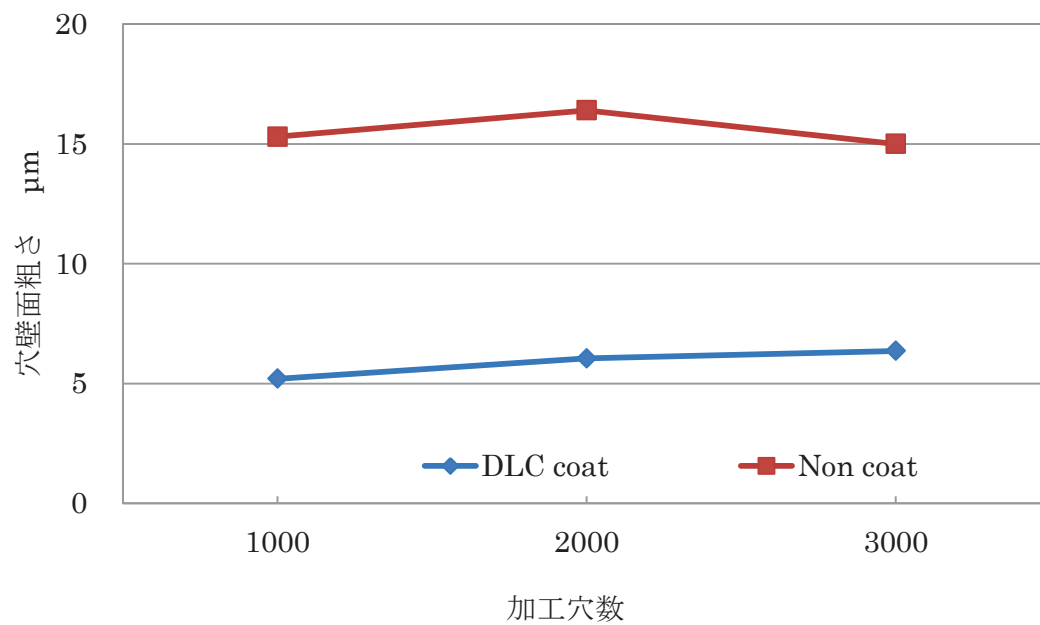
図 2-18 は、2 枚目のプリント配線板の穴を拡大したものである。図中の、穴断面のくぼんでいる箇所はエポキシ樹脂層であり、くぼみの少ない箇所がガラスクロス層である。エポキシ樹脂層のくぼみは、絶縁材料内の硬さの違いや熱による材料軟化性が影響したものと考えられる。

2.3.8 穴壁面粗さに及ぼすドリルコーティングの影響

DLC（Diamond Like Carbon）をコーティングしたドリルとノンコーティングドリルを用いて実験条件②で加工を行った。加工後の穴壁面測定結果のコンター図を図 2-19(a)に、穴壁底面の表面粗さを図 2-19(b)に示す。なお、コンター図は図 2-19(a)中に示すように穴断面を上から観察した場合



(a) コンター図



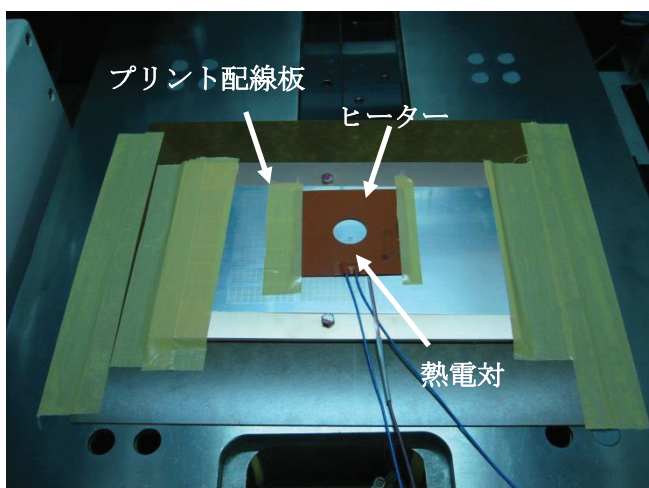
(b) 表面粗さ

図 2-19 ドリルコーティングの違いによる穴壁面コンター図と穴壁面粗さ

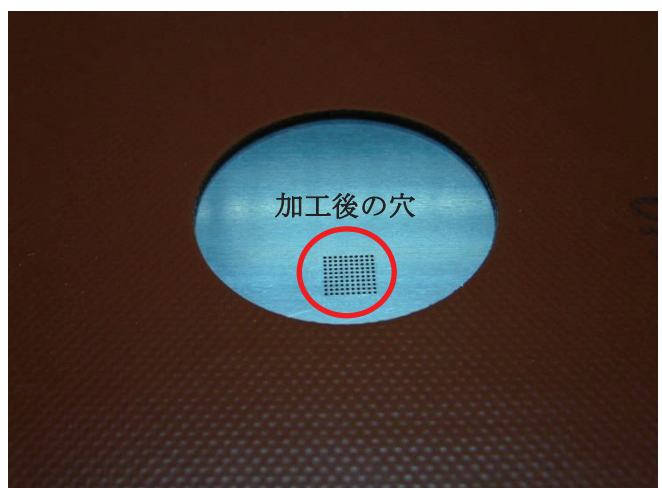
のくぼみをカラーで図示したものである．穴底面が青色部であり，その濃淡に変化がみられるものは穴壁面のくぼみが大きいことを示している．測定した穴は，1000 穴，2000 穴および 3000 穴の平均的な断面のものとした．図 2-19 より，コンター図，表面粗さともに DLC コーティングドリルで加工した穴壁面粗さは，ノンコーティングドリルで加工したそれと比較して小さいことがわかる．特に，図 2-19(a)から，DLC によりプリント配線板のエポキシ樹脂層に生じる穴壁面のくぼみが軽減されていることがわかる．これは非鉄金属に対して良好な摩擦特性をもつ DLC が，銅箔の切りくず排出性を向上させた結果と考えられる．

2.3.9 穴壁面粗さに及ぼす被削材温度の影響

プリント配線板の穴壁面におけるくぼみは，上述したとおり切削温度と切りくず排出性が影響しているものと考えられる．そこで，穴壁面粗さに及ぼす被削材温度の影響を調べた．実験は，加熱と冷却の 2 通りで行った．加熱は，図 2-20 に示すように中央に穴のあいたシート状のヒータを被削材上にセットし，ヒータ温度をフィードバック制御する方法とした．冷却は，エアクーラ（ニッシン産業(株)製：AC-60 型）を使って，加工点近傍に約 -20°C の冷風を当てる方法とした．なお，加工点近傍の実際の温度は，



(a) セッティング外観



(b) 加工後の穴とシートヒータ

図 2-20 被削材温度設定方法

実験条件
 回転速度 $300,000\text{min}^{-1}$
 送り量 $7.5\mu\text{m/rev}$
 ドリル径 $\phi 0.3$
 プリント配線板 $1.0\text{t}\times 4\text{sheets}$

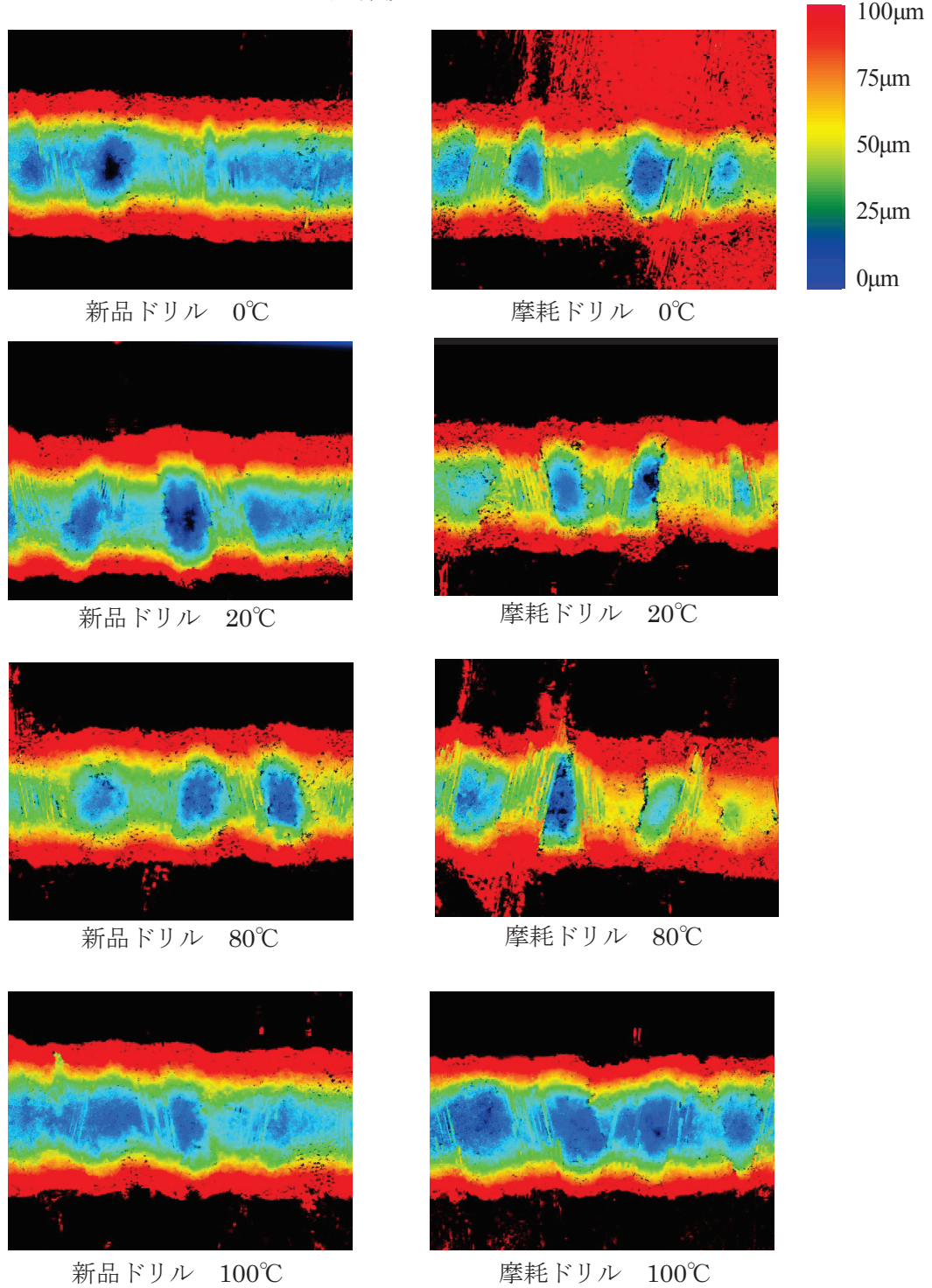


図 2-21 被削材温度と穴壁面粗さの関係

プリント配線板に張り付けた熱電対により計測した．実験は，新品ドリルと 3000 穴加工後の摩耗ドリルを用いて，被削材温度を 0℃，20℃，80℃，100℃に設定した．図 2-21 は，加工後の穴を穴中心まで半径方向に研磨後，レーザ顕微鏡で穴壁面の凹凸を計測し，それをコンター図にした結果を示す．

図 2-21 より，被削材温度が 20℃の場合には穴断面の濃淡が激しいが，0℃と 100℃の場合には穴壁面粗さが改善されていることがわかる．0℃の場合には，切削温度そのものを低下させることで，切削温度がエポキシ樹脂のガラス転移点である 200℃を下回ったため，穴壁面のくぼみが軽減されたものと考えられる．また，100℃については，被削材温度上昇による材料軟化により切削性が良好になり，それにともない切りくず排出性が改善されたため，穴壁面のくぼみが軽減されたものと考えられる．

2.4 結言

本章では，高速度カメラや切削抵抗センサを使ってプリント配線板の加工特性を実験的に調べた．得られた結果を以下に示す．

- (1) プリント配線板構成材料である銅箔，ガラスクロス，樹脂の中で，銅箔部分の加工は切削力が大きい上に，他の材料との切りくず排出速度の違いにより排出不良が生じやすい．その結果，銅箔の切りくずにより穴壁面粗さの悪化や急激なトルク上昇が生じやすい．
- (2) 切削速度が低い場合，ガラスクロスによる微小なチッピングがドリル逃げ面に発生し，高速の場合にはアブレーション摩耗が発生する．また，ドリルショルダ部の摩耗により加工穴の穴径が小さくなる．
- (3) プリント配線板を複数枚重ねて加工した場合の穴壁面粗さは，ドリル入口側のプリント配線板の樹脂層でくぼみが発生しやすい．
- (4) DLC コーティングドリルを使用すること，被削材温度を 0℃あるいは 100℃に設定することで穴壁面粗さを小さくすることができる．

第3章 プリント配線板の加工特性に及ぼすエントリーシートの影響

3.1 緒言

プリント配線板のドリル加工では，従来からドリルの食い付き性向上や真直性向上，バリの抑制を目的としてプリント配線板の上面にアルミニウム製のエントリーシートを敷いて加工がなされている³⁻¹⁾．また，産業の発展にともないスルーホールの小径化，高品位化の要求が高まっており，スルーホールの加工特性に及ぼすエントリーシートの重要性が大きくなっている³⁻²⁾．

そのような中，エントリーシートには従来から純アルミニウムが使われてきたが，工具の小径化によりエントリーシートの板厚が薄くなることで板厚方向のエントリーシートの剛性が低下し，ドリル真直性やバリの抑制効果が得られなくなっている．そこで最近では，純アルミニウムよりも高剛性の 3000 系のアルミニウム合金が使用されている³⁻³⁾．

しかしながら，プリント配線板の加工特性に及ぼすエントリーシートのアルミニウム材料の影響については，これまで系統立てられた研究がなされていない．そこで本章では，3 種類のアルミニウム製のエントリーシートを用いて，プリント配線板のドリル加工特性を調べた．

3.2 実験方法および実験条件

実験では，切削力の測定，ドリルへの切りくず巻き付き状況の観察，穴位置精度の測定を行い，加工特性や穴位置精度に及ぼすアルミニウム材料の影響を考察した．実験に使用した加工機，実験条件，切削力や穴位置精度の測定方法は，第 2 章で述べたものと同じである．

実験に用いたエントリーシートは，99.5%の純アルミニウムをひずみ硬化させた A1050-H18，それを析出処理した A1050-H18 析出処理，純アルミニウムに Mn を添加した A3003-H18 相当品の 3 種類とした．それらの材料特性を表 3-1 に，材料成分を表 3-2 に示す．3 種類のエントリーシートを比較すると，A3003-H18 が他の 2 つよりかなり硬く，引張強さも高い．また，A1050-H18 析出処理は析出処理により伸びと引張強さが低下し，もろくなっていることがわかる．

表 3-1 アルミニウム板の材料特性

名称	熱処理	引張強さ [N/mm ²]	伸び [%]	硬さ [HV]
A1050-H18	なし	230	6	58
A1050-H18 析出処理	析出処理	185	4	51
A3003-H18	なし	300	4	103

表 3-2 アルミニウム板の材料成分

成分	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
A1050	0.03	0.08	0.29	0.01 以下	0.01 以下	0.01 以下	0.02	99.5 以上
A3003	0.02 以下	0.05	0.15	1.6	0.03 以下	0.03 以下	0.02	残部

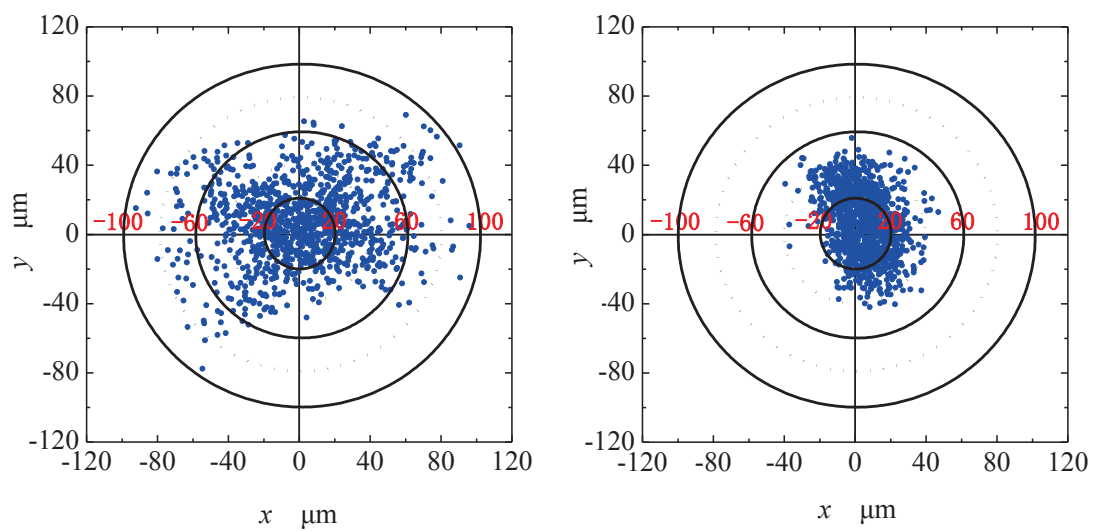
3.3 実験結果および考察

3.3.1 エントリーシートの効果

図 3-1 は、穴位置精度に及ぼすエントリーシートの有無の影響を示している。これは、プリント配線板のみの加工と、板厚 0.15mm、材料 A1050P-H18 のエントリーシートを敷いた場合の加工を実験条件①で行い、その穴位置精度を比較したものである。なお、穴位置精度はプログラム座標値と加工座標値の差を表したものである。図 3-1 より、エントリーシートがない場合、プリント配線板の最下面の穴位置精度は最大 100 μ m 程度であるのに対し、エントリーシートがあると最大 50 μ m 程度まで向上していることがわかる。

このような違いは、食い付く材料の硬さと表面粗さが影響しているものと考え、それらを測定した。プリント配線板の銅箔部の硬さをビッカース硬度計（(株)アカシ製：AAV-4）で計測した。その結果、プリント配線板の銅箔硬さは 200HV 程度に対し、エントリーシートの純アルミニウムは 50HV 程度と 4 倍以上硬さが異なることがわかった。また、プリント配線板とエントリーシートの表面をレーザ顕微鏡（(株)キーエンス製：VK9500）で計測した結果を図 3-2 に示す。図 3-2 より、プリント配線板は最大で 3 μ m 程度の凹凸があるのに対し、エントリーシートは 1 μ m 程度であることがわかる。

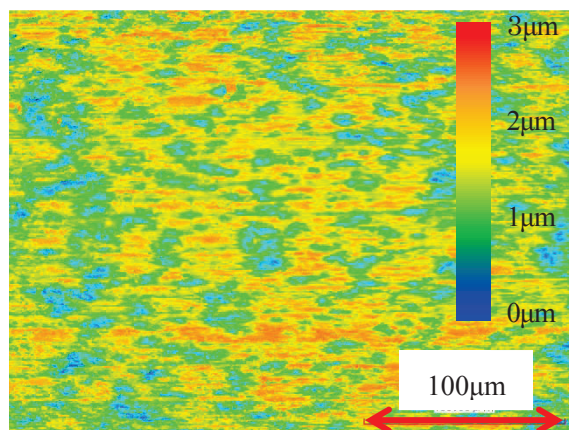
以上の結果から、プリント配線板のドリル加工においては食い付く材料の硬さと表面粗さが穴位置精度に影響すると考えられる。



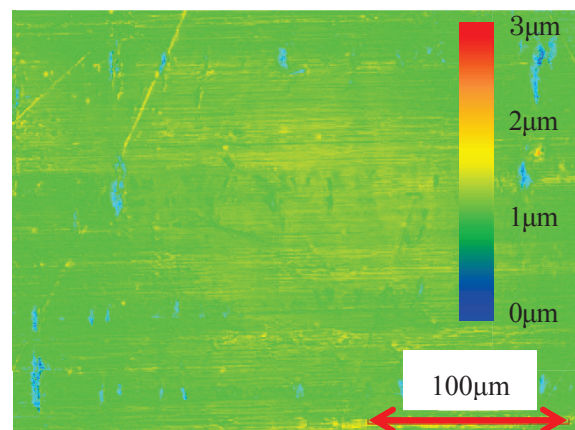
(a) エントリーシートなし

(b) エントリーシートあり

図 3-1 エントリーシートの有無による穴位置精度の比較



(a) プリント配線板



(b) エントリーシート

図 3-2 プリント配線板とエントリーシートの表面粗さ

3.3.2 穴位置精度に及ぼすエントリーシートの表面粗さの影響

エントリーシートには，圧延工程で圧延ロール面の凹凸がエントリーシート表面に転写され，圧延方向に筋がつき，それと直角方向に凹凸ができる．図 3-3 は，この凹凸を高精度輪郭形状測定機（(株)テラーホブソン製：Talysurf s6）で計測した結果を示す．図 3-3 より，振幅が数 μm 程度，波長が数十～数百 μm 程度のうねりが確認できる．工具が小径になると，このようなうねりが穴位置精度に影響する可能性がある．そこで，図 3-3 の結果を図 3-4 に示すように測定方向に対し $50\mu\text{m}$ 間隔で直線近似し，その傾きの絶対値を算出した．求めた傾きの絶対値と実験条件①で加工した場合の穴位置精度との関係を図 3-5 に示す．図 3-5 より，傾きが大きく（急こう配）なれば穴位置精度が悪化する傾向にあることがわかる．この結果より，エントリーシートの凹凸によりドリルの進入角度が変化するものと考えられる．

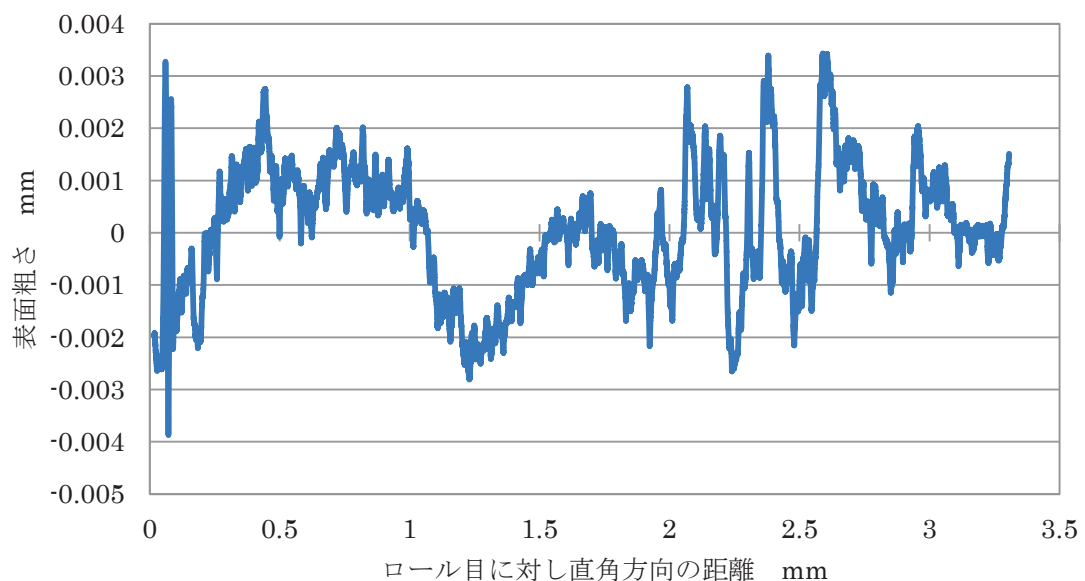


図 3-3 エントリーシートの表面形状

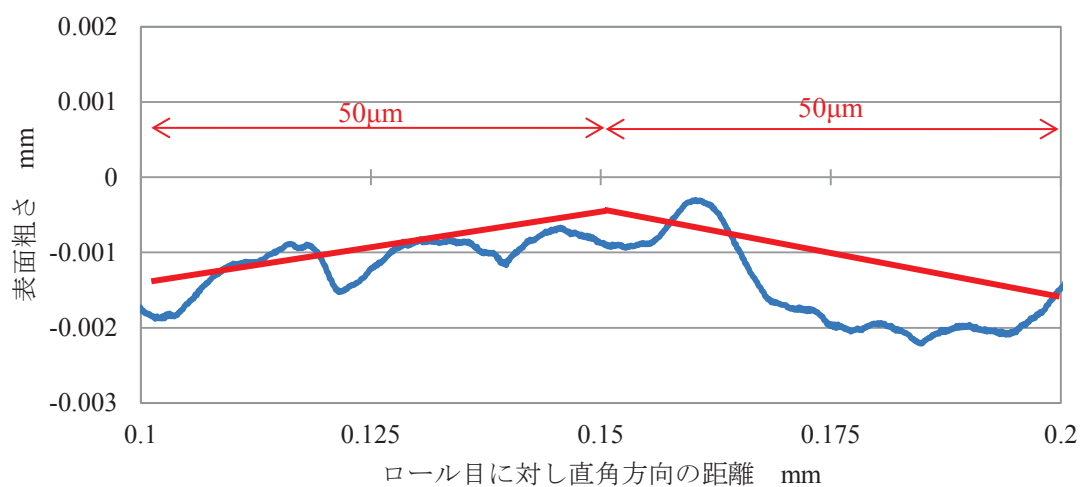


図 3-4 エントリーシート表面の傾きの算出方法

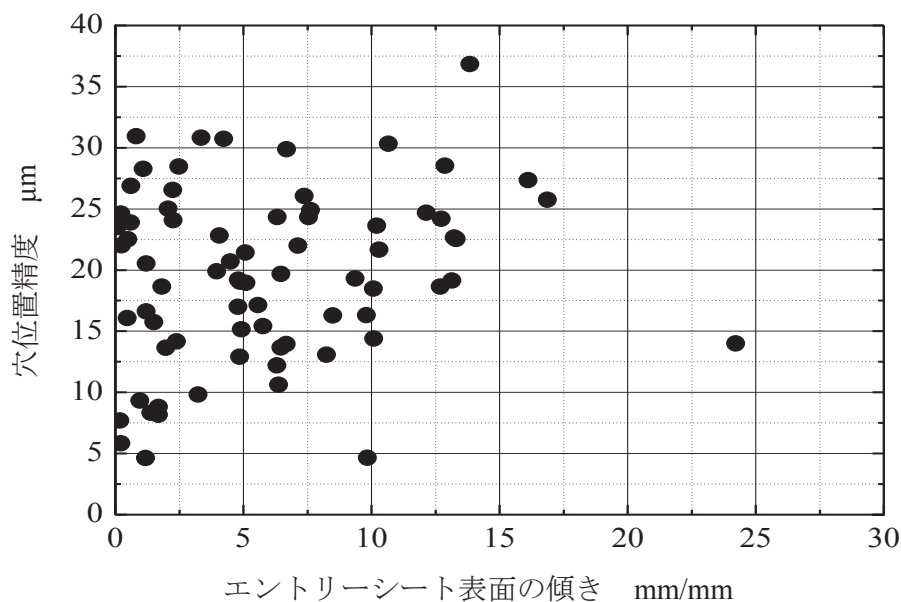
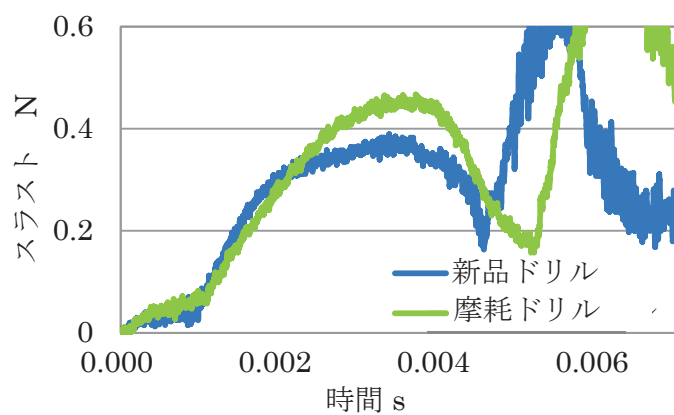


図 3-5 穴位置精度に及ぼすエントリーシート表面の傾きの影響

3.3.3 加工特性に及ぼすエントリーシートのアルミニウム材料の影響

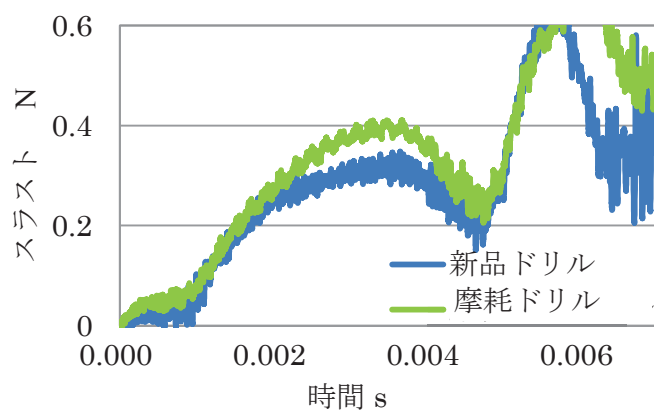
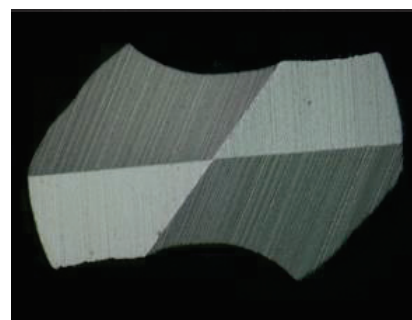
エントリーシートには，一般に純アルミニウムが用いられるが，近年アルミニウム合金も使用されるようになってきた．そこで，切削力，切りくず巻き付き性，穴位置精度に及ぼすアルミニウム材料の影響を調べた．

図 3-6 は，エントリーシートにドリル先端が食い付いた時の，ドリルに作用するスラストを測定した結果を示す．なお，実験は新品のドリルと



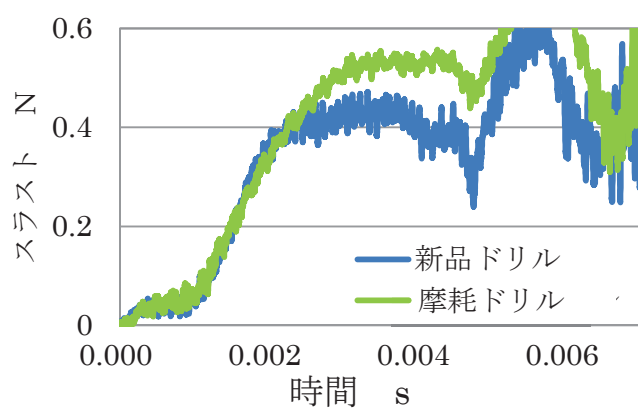
(a) A1050-H18

新品ドリル



(b) A1050-H18 析出処理

摩耗ドリル



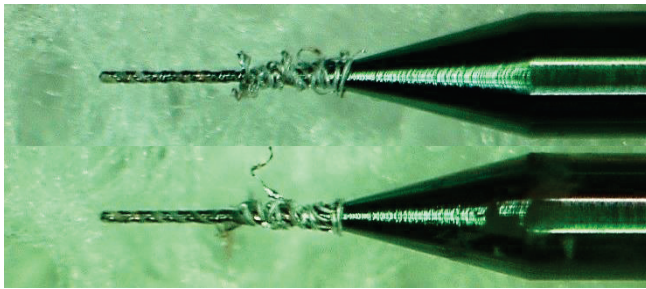
(c) A3003-H18

図 3-6 各種アルミニウム材料を用いた時のスラストの変化

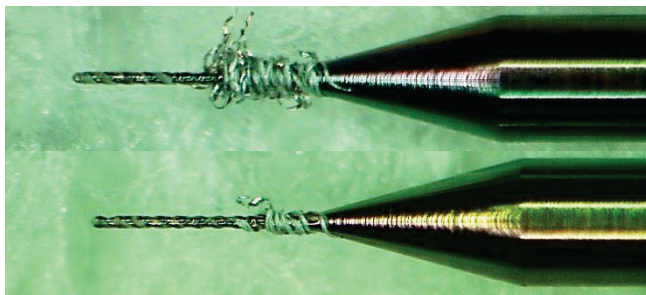
2000 穴加工後の摩耗ドリルで行った．図 3-6 より，スラストは A3003-H18(図 3-6(c))が最も大きく，次に A1050-H18 (図 3-6(a))，そして A1050-H18 析出処理(図 3-6(b))の順に小さくなることがわかる．これは，表 3-1 の A3003-H18 の引張強さや硬さが大きいためスラストが大きくなったものと考えられる．また，いずれの材料の場合も摩耗したドリルのスラストは，新品ドリルの場合と比べて 2 割程度大きくなっていることがわかる．これは，ドリルの摩耗により切削性が悪化したためと考えられる．

ドリルには，エントリーシート加工時に切りくずが巻き付き，フルートに残存することで切りくずの排出不良を招き，ドリルの折損に至る場合がある．そのため，エントリーシートのアルミニウム切りくずの巻き付きは極力少ないほうが好ましい．そこで，各アルミニウム材料に対してドリルへの切りくずの巻き付き性について加工後のドリルを観察して調べた．図 3-7 は，加工後のドリルをマイクロスコープで観察した結果を示す．図 3-7 より，切りくずが巻き付きにくいのは，表 3-1 に示すように伸びが低く材料強度の高い A3003-H18 であり，切りくずが巻き付きやすいのは材料強度の低い A1050-H18 析出処理であることがわかる．また，切りくずの巻き付き状況を高速度カメラで観察する（図 3-8）と，どちらの材料においても一度はドリルに切りくずが巻きつくが，A3003-H18 ではその後切りくずがドリルから離れていき，A1050-H18 析出処理ではフルート部に切りくずがしっかりとまとわりつきながら排出されることが明らかになった．以上の結果から，エントリーシートに用いるアルミニウム材料の材料強度や伸びの違いが切りくず巻き付き性に大きく影響を及ぼすことがわかった．

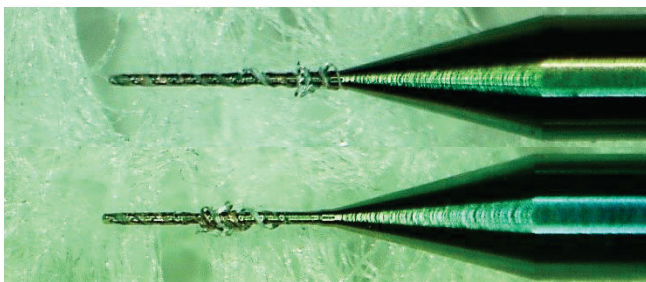
エントリーシートの効果の一つとして，1.3.4 項で述べたガイド効果がある．ガイド効果とは，加工中のドリルの曲がりをエントリーシートにあ



(a) A1050-H18

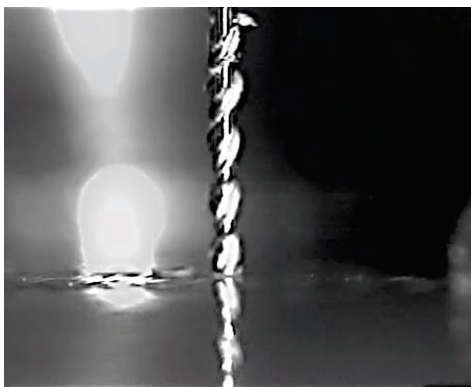


(b) A1050-H18 析出処理



(c) A3003-H18

図 3-7 アルミニウム材料の違いによるドリルへの切りくず巻き付き性の比較



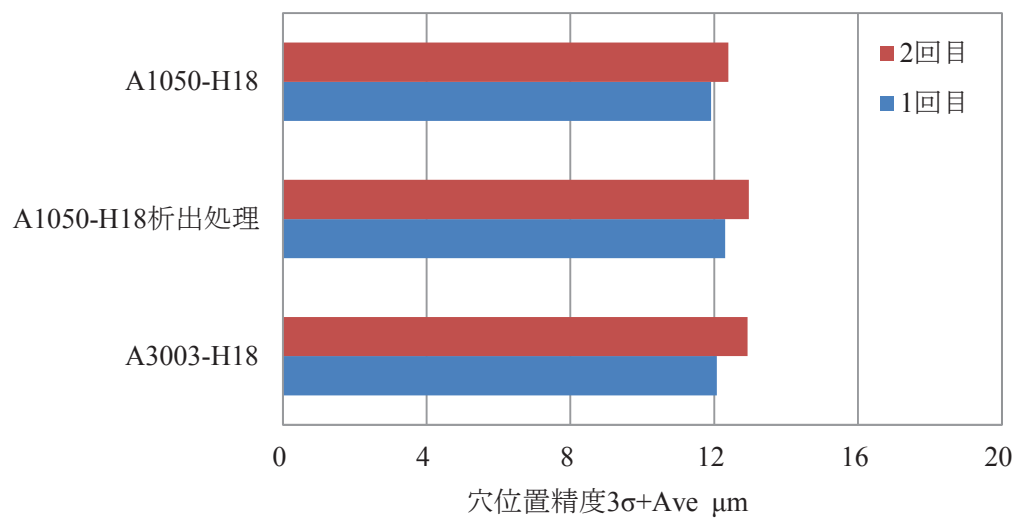
(a) A1050-H18 析出処理



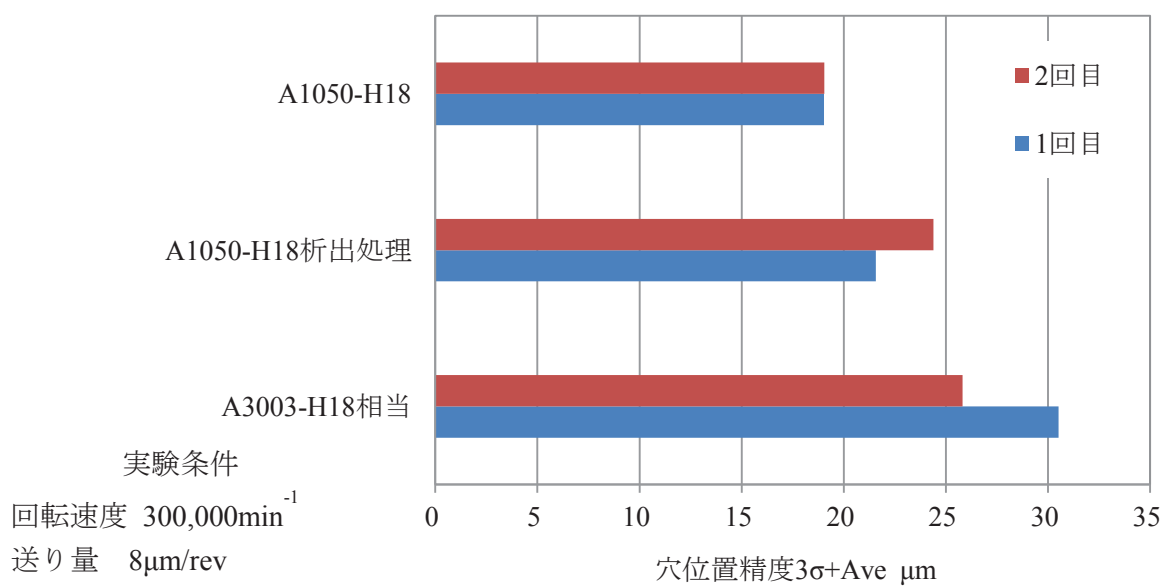
(b) A3003-H18

図 3-8 切りくず巻き付き性とアルミニウム材料の関係（瞬間撮影）

いた穴の円筒面がドリル側面を保持することでドリルの真直性が保たれることである。これには，エントリーシートの板厚と材料が影響するものと考えられる．そこで，エントリーシートの材料と穴位置精度の関係を調べた．実験では 12000 個の穴加工を行った．1～6000 穴までの穴位置精度を図 3-9(a)に，6001～12000 穴までの穴位置精度を図 3-9(b)に示す．



(a) 1～6000 穴



(b) 6001～12000 穴

図 3-9 アルミニウム材料と穴位置精度の関係

図 3-9 より，1～6000 穴までの加工初期は穴位置精度に及ぼす材料の影響は見られないが，6001～12000 穴の加工後期では A1050-H18 の穴位置精度が最も良好で，次に A1050-H18 析出処理，A3003-H18 の順であることがわかる．材料強度の高い A3003-H18 は，ドリルの真直性を保つ効果は他の材料に比べて高いが，図 3-6 に示したようにスラストが大きいためドリルが摩耗しやすく，加工後期において切削性悪化による穴位置精度の低下を招いたものと考えられる．そのため，ガイド効果と耐摩耗性の双方の関係により，A1050-H18 が最も良好な穴位置精度となったものと考えられる．

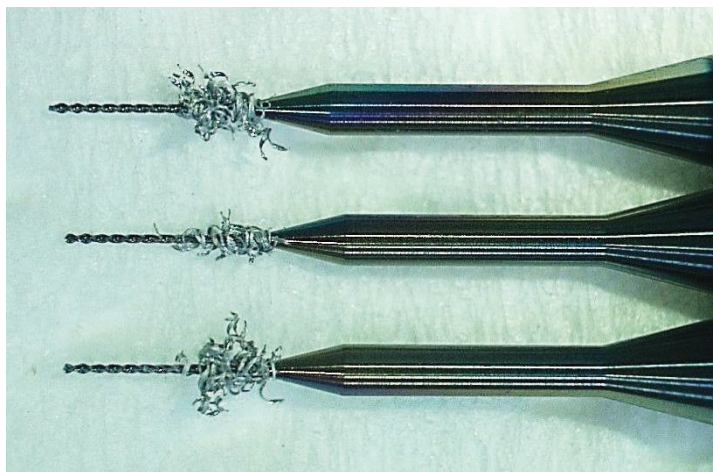
3.3.4 加工特性に及ぼすエントリーシートのアリミニウム板厚の影響

板厚が 0.1mm, 0.12mm および 0.15mm の 3 種類のエントリーシート（材質は，いずれも A1050-H18）を用いて加工した場合の切りくずの巻き付き性と穴位置精度について調べた．

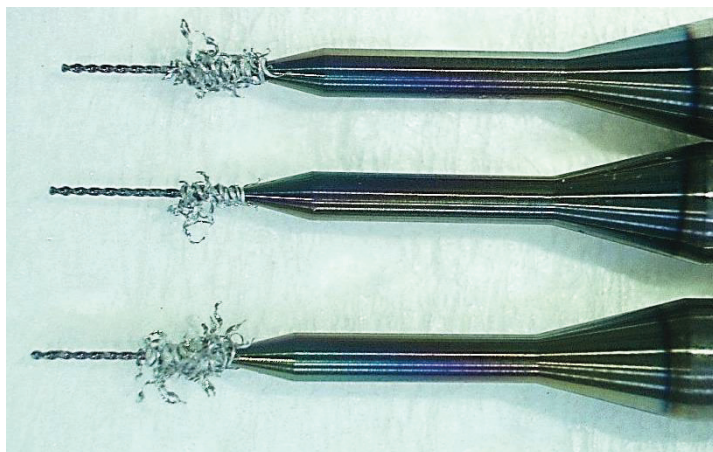
12000 穴加工後のドリルを図 3-10 に示す．図 3-10 より，板厚が厚いほどドリル根元部への切りくずの巻き付きが増えていることがわかる．純アリのミニウムのドリル加工は，一般に連続型の切りくずが生成されることで知られているが，本実験でも連続型の切りくずが生成され，板厚が厚いほど切りくずの長さが長くなったためと考えられる．

エントリーシートの各板厚に対して，加工穴数の増加にともなう穴位置精度の悪化について調べた結果を図 3-11 に示す．なお，測定箇所はエントリーシート裏面とプリント配線板最下面を測定している．図 3-11 より，エントリーシート裏面の穴位置精度は，板厚によらず同程度である．しかし，プリント配線板最下面の穴位置精度では，板厚 0.12mm が最も良好で，次に 0.15mm，0.1mm の順で悪くなる．ドリルのガイド効果としては，板厚 0.15mm が 3 種類の中で最も高いものの，上述のように板厚が厚いこ

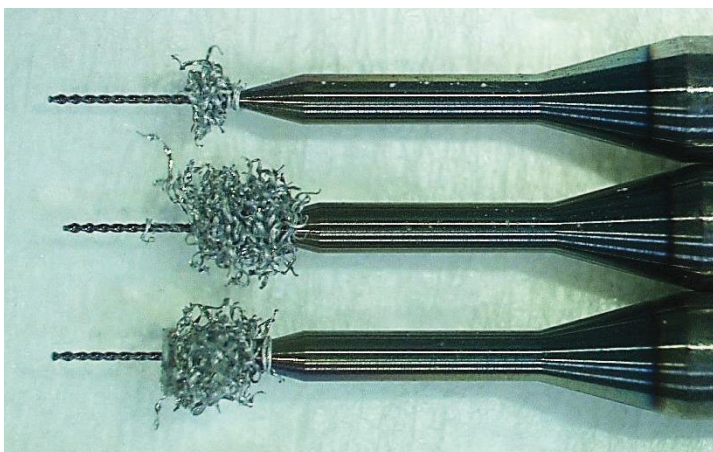
実験条件
回転速度 $160,000\text{min}^{-1}$
送り量 $15\mu\text{m/rev}$
工具径 $\phi 0.15$
被削材 $t0.15\text{mm}\times 4\text{sheets}$



(a) 板厚 0.1mm



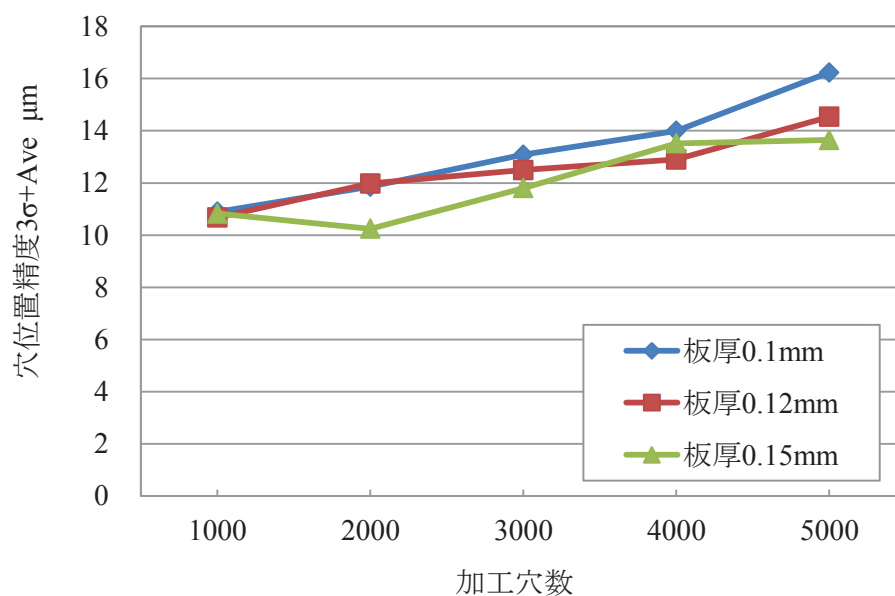
(b) 板厚 0.12mm



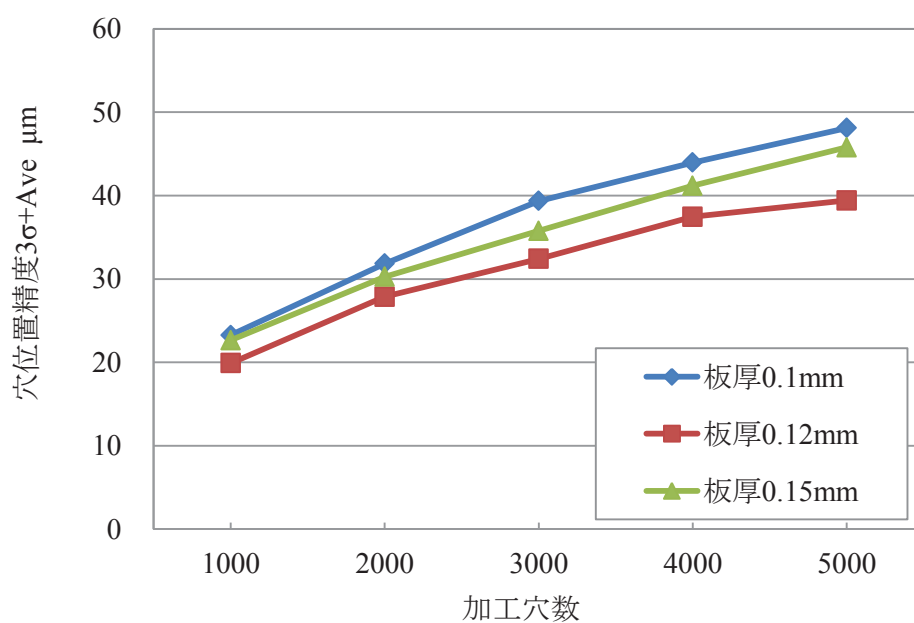
(c) 板厚 0.15mm

図 3-10 アルミニウム板厚と切りくず巻き付き性の関係

実験条件
 回転速度 $160,000\text{min}^{-1}$
 送り量 $15\mu\text{m/rev}$
 工具径 $\phi 0.15$
 被削材 $t0.15\text{mm}\times 4\text{sheets}$



(a) エントリーシート裏面



(b) プリント配線板最下面

図 3-11 穴位置精度に及ぼす加工穴数の影響

とで切りくずの巻き付きが発生し、切りくず排出性の悪化により穴位置精度に影響が出たものと考えられる。また、板厚 0.1mm の場合には、ドリルのガイド効果が劣ったため、穴位置精度が悪くなったと考えられる。

以上のことから、ドリル径に最適なエントリーシートの板厚があると考えられる。

3.4 結言

本章では、プリント配線板のドリル加工特性に及ぼすアルミニウム製エントリーシートの影響について、材料および板厚を変えることにより調べた。得られた結果を以下に示す。

- (1) アルミニウム製エントリーシートを使った加工は、プリント配線板のみの加工に比べて、ドリルが最初に接触する材料の表面の粗さや硬さが小さいことから穴位置精度が改善される。
- (2) ドリルへの巻き付き性を 3 種類の異なる材料で比較した結果、アルミニウム材料の硬さや引張強さが大きいと巻き付きやすいことがわかった。
- (3) エントリーシートに使うアルミニウム材料や板厚は、ドリル径や実験条件に応じて最適なものを選定する必要がある。
- (4) エントリーシートでは、数 μm 程度の凹凸でも表面形状が穴位置精度に影響を及ぼす。

第4章 穴位置精度に及ぼすエントリーシート樹脂特性の影響

4.1 緒言

近年，環境低負荷意識の高まりから，EU加盟国で施行された RoHS 規制により，プリント配線板に対して融点の高い鉛フリーはんだが採用され，リフローによる電子部品のはんだ付け温度の上昇によりプリント配線板の反りやねじれが問題になっている．これらの対策として，プリント配線板には高弾性で低熱膨張の材料が使用されるようになってきており，このため，素材が難削材化し，ドリル加工はより困難となってきた⁴⁻¹⁾．その結果，工作機械のスピンダルをはじめ，ドリルやエントリーシートなどの性能向上による加工性の改善が求められている．そのような中，プリント配線板を製造する業界では，加工性が改善できる樹脂付きエントリーシートの需要が急速に増えている．樹脂付きエントリーシートは，アメリカの Lubra Sheet corp.で 1980 年代に開発・特許取得されたのが始まりといわれている．現在，エントリーシートは国内で 5 社程度，海外では韓国，台湾，中国などを始めとして多くの製造企業が参入している．

樹脂付きエントリーシートは，アルミニウム板の上面あるいは下面に塗布，またその内部に樹脂を挟んだ製品のことであり，近年では上面に塗布する方法が一般的である．樹脂の種類は，大きく分けて水溶性と不水溶性がある．プリント配線板は穴加工後，水洗，溶剤洗浄をした後に銅めっきが施されるが，このとき穴壁面にエントリーシートの樹脂部が残存するとめっき不良につながる．そのため，不良率削減の観点から国内で使われるほとんどの樹脂付きエントリーシートの樹脂は水溶性である．その背景には，プリント配線板が自動車や医療機器など人命につな

がる製品に組み込まれることがあり，特に国内では水溶性の樹脂付きエントリーシートを使う傾向にある．

樹脂付きエントリーシートの樹脂材料に関して公開されている研究はなく，公開されているのは特許情報やメーカーの加工事例⁴⁻²⁾のみである．それらによると，国内では主にポリエチレングリコールを主体とした水溶性の樹脂が使われている．また，加工穴の穴位置精度に及ぼす樹脂付きエントリーシートの影響については，渡邊らのエントリーシート食い付き時に発生する求心作用の解明に関する研究⁴⁻³⁾⁴⁻⁴⁾がある．これらの研究では，樹脂付きエントリーシートを使うことによって回転振れのあるドリルでも求心作用によりドリル回転中心に位置決めされ，穴位置精度が向上すると報告されている．しかし，穴位置精度に及ぼす樹脂特性の影響については研究されていない．

そこで本章では，特性の異なる樹脂付きエントリーシートを使い，ドリル先端の挙動評価，加工後の穴位置精度測定および切削力の測定を行い，それらの結果から穴位置精度に及ぼす樹脂特性の影響を考察した．

4.2 実験方法およびエントリーシートの樹脂特性

4.2.1 加工機および実験条件

実験は，加工穴品位評価試験と加工特性評価試験の 2 つを行った．前者では，第 2 章の図 2-1 に示した高速回転主軸搭載のプリント配線板用穴加工機を使用した．後者における求心作用評価と切削力の測定のみ，各種センサ等のセッティング上，エアタービンスピンドル（大昭和精機株式会社：RSX7）を搭載したマシニングセンタ（安田工業株式会社：YBM640V）を使用した（図 4-1）．なお，実験条件は 2 章の表 2.3 の実験条件②（回転



図 4-1 加工特性評価試験に使用したマシニングセンタ外観

速度 $300,000^{-1}$ ，送り量 $8\mu\text{m}/\text{rev}$ ）とした．

4.2.2 加工穴品位評価試験方法

エントリーシートの加工穴品位評価試験として，穴位置精度の評価を行った．穴位置精度評価方法の詳細については，2.2.3 項で述べている．

4.2.3 加工特性評価試験方法

エントリーシート食い付き時にはドリル先端が求心する場合がある．そこで，ドリル求心性に及ぼすエントリーシート樹脂の影響を調べるため，ドリルの回転振れを測定した．

求心性の評価に使用したドリルは，図 4-2 に示す $\phi 0.15$ のルーマ形ツイストドリルで，先端のみ溝のある特殊ドリルである．諸元を表 4-1 に示す．なお，回転振れは図 4-3 に示すようにドリルシャンク部円筒面を所定の量だけ平面研削し，その研削した面を 4 つにスリ割されたコレットの 1 つの面に合わせてチャッキングすることにより発生させた．

ドリル先端の挙動は，図 4-4 に示すように同期した 2 つの非接触変位

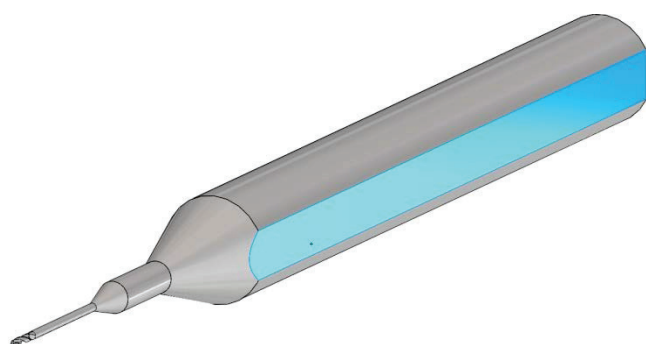
計（株式会社キーエンス：センサ LK-H020，アンプ LK-G5000V）で回転振れを計測し，それをリサージュ図形にしてドリル先端の移動軌跡として求めた．なお，変位の測定精度については，主軸を停止したマシニングセンタをプログラムにより一定速度の送りで移動させ，そのときのドリルの



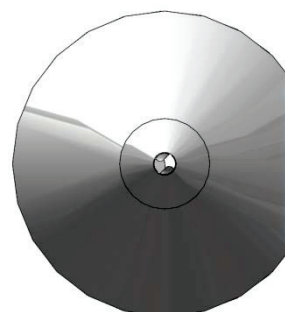
図 4-2 特殊ドリル

表 4-1 実験に用いたドリルの諸元

材質	超微粒子超硬
直径	$\phi 0.15$
溝長	0.4mm
ボデー	2.5mm
芯厚	0.05mm



(a) 3 次元的にみた図



(b) ドリル先端からみた図

図 4-3 回転振れを生じさせるためのドリル

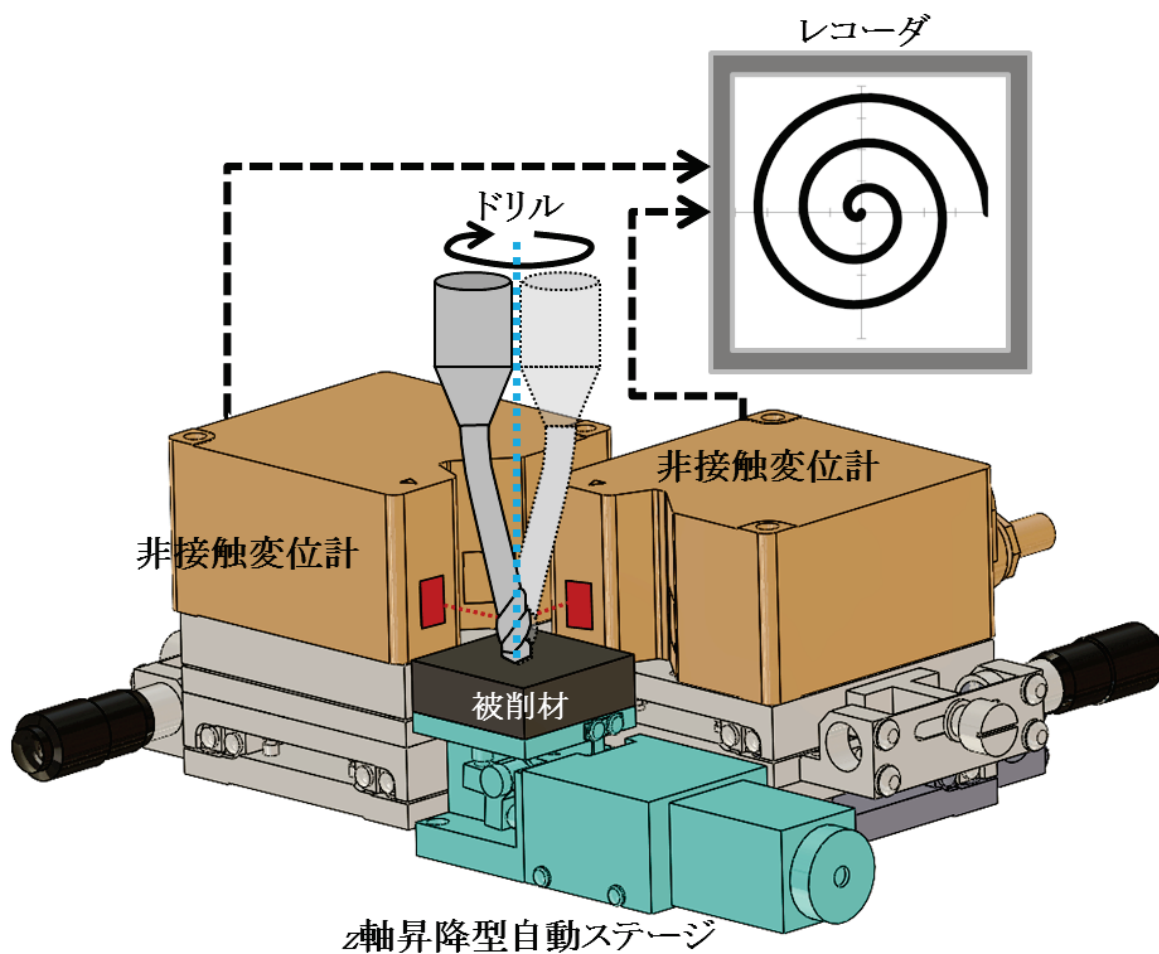
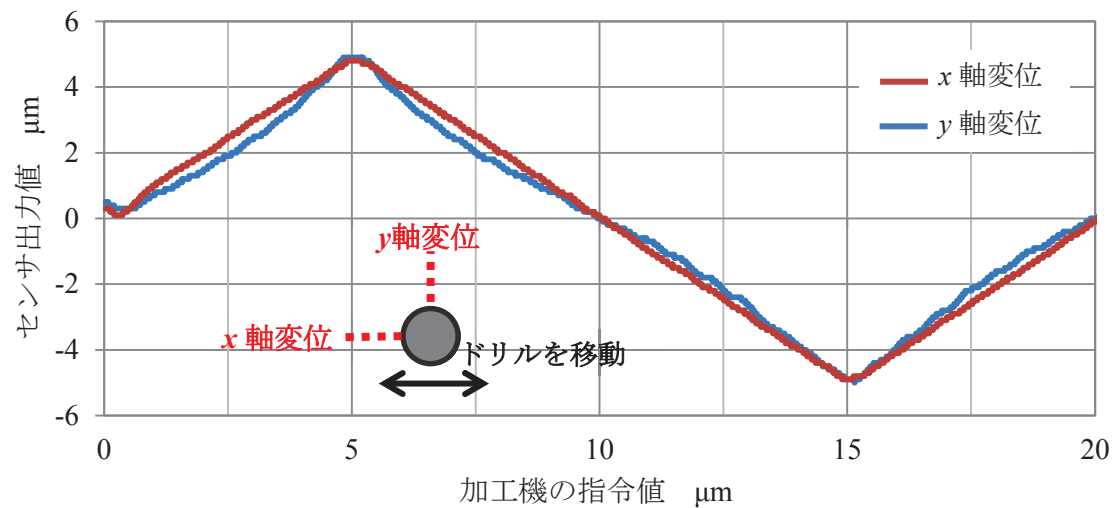
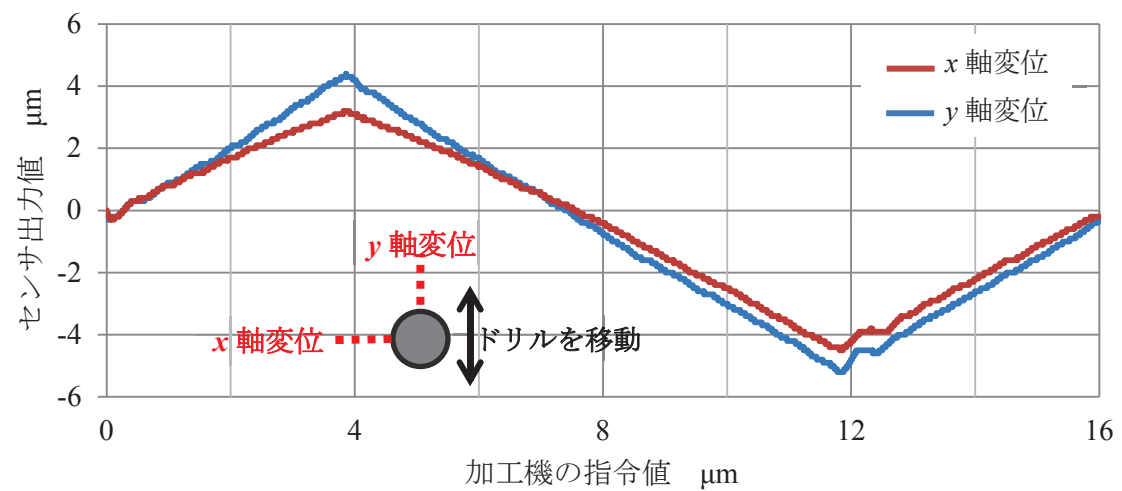


図 4-4 ドリル先端の回転振れ計測方法

変位を非接触変位計で測定し、チェックした。x 軸方向にマシニングセンタを直線移動した場合の x 軸および y 軸方向のドリル変位センサ出力を図 4-5(a)に、y 軸方向にマシニングセンタを直線移動した場合の x 軸および y 軸方向のドリル変位センサ出力を図 4-5(b)に示す。なお、測定時の加工機の動きは、図中に示すように移動軸をドリルに近づく方向に $5\mu\text{m}$ 程度移動し、そして離れる方向に $10\mu\text{m}$ 程度移動し、最後に初めの位置に戻るプログラムとした。そのため、移動軸側のセンサ出力の理想的な波形は三角波となる。図 4-5 より、移動方向と同じ方向に取り付けたセンサ出力はほぼ直線であり、直角方向に取り付けたセンサ出力はシャンク



(a) ドリルを x 軸方向に直線移動した場合



(b) ドリルを y 軸方向に直線移動した場合

図 4-5 非接触変位計の測定精度

円筒面形状をとらえていることがわかる．このことから，回転振れ量が $10\mu\text{m}$ 程度であれば，それを測定することは可能であり，かつ十分な測定精度と言える．また，常にドリルの同じ箇所を計測できるように主軸の z 軸を固定し，被削材をステッピングモータ（中央精機㈱：ALV-300-HM）により上下させた．

ドリル先端の挙動を上述のような方法で計測する場合，本研究で利用したセンサのサンプリング速度とスポット径， z 軸昇降型自動ステージの移動速度の関係で，回転速度，送り量および回転振れの測定に限界がある．そのため，一部の評価は測定可能な実験条件（主軸回転速度 $20,700\text{min}^{-1}$ ，送り量 $7.5\mu\text{m/rev}$ ）とした．

また，エントリーシート加工時の切削力の測定方法は，第 2 章の 2.2.2 項と同じ方法とした．

4.2.4 エントリーシートの樹脂特性

実験に使用した樹脂付きエントリーシートは，板厚 0.12mm の純アルミニウム板（材質 A1000 系）の上面に樹脂を塗布したもので，ブランクは樹脂なしのアルミニウム製エントリーシートである．なお，樹脂は市販の高分子化合物系のポリエチレングリコールを主成分にしたもの（以下，PEG 系樹脂付きエントリーシートと呼ぶ）と(株)片木アルミニウム製作所，大村塗料(株)および(地独)鳥取県産業技術センターとの共同研究により開発された植物系ワックスを主成分にしたもの（以下，wax 系樹脂付きエントリーシートと呼ぶ）の 2 種類について比較試験を行った．なお，樹脂の膜厚は約 $40\mu\text{m}$ である．

4.2.4.1 エントリーシート樹脂部の硬さ

エントリーシート樹脂部の機械的性質の中で，ドリル先端の食い付き性に影響するものとして硬さがある．そこで，PEG 系樹脂付きエントリーシートと wax 系樹脂付きエントリーシートの樹脂部とアルミニウム板の硬さを，弾性回復特性まで計測可能なナノインデンテーションテスト（(株)ミットヨ製：微小表面材料表特性評価システム MZT-500）を用いて測定した．図 4-6 は，ダイヤモンド圧子に 5mN の荷重を 10 秒で負荷

し、その後 10 秒間保持した後、また 10 秒かけて除荷する場合の荷重と押し込み深さの関係をグラフにしたものである。図 4-6 より、アルミニウム板は押し込み深さが約 $1\mu\text{m}$ であるのに対し、PEG 系樹脂と wax 系樹脂は約 $4.5\mu\text{m}$ と柔らかいことがわかる。また、弾性回復曲線を比較すると、アルミニウム板は直線的に弾性回復しているが、樹脂は曲線的に回復している。PEG 系樹脂と wax 系樹脂を比較すると、wax 系樹脂は一定荷重時の押し込み深さが大きく、PEG 系樹脂は弾性回復が大きい。

4.2.4.2 エントリーシート樹脂部の熱溶解特性

エントリーシートの樹脂部は、ドリルのフルート部に巻き付き、溶解することにより切削温度を低下させると考えられるため、低融点、高熱容量のものが選定される傾向にある。ただし、ハンドリング性や夏場での保管を考えると融点は約 60°C が下限である。

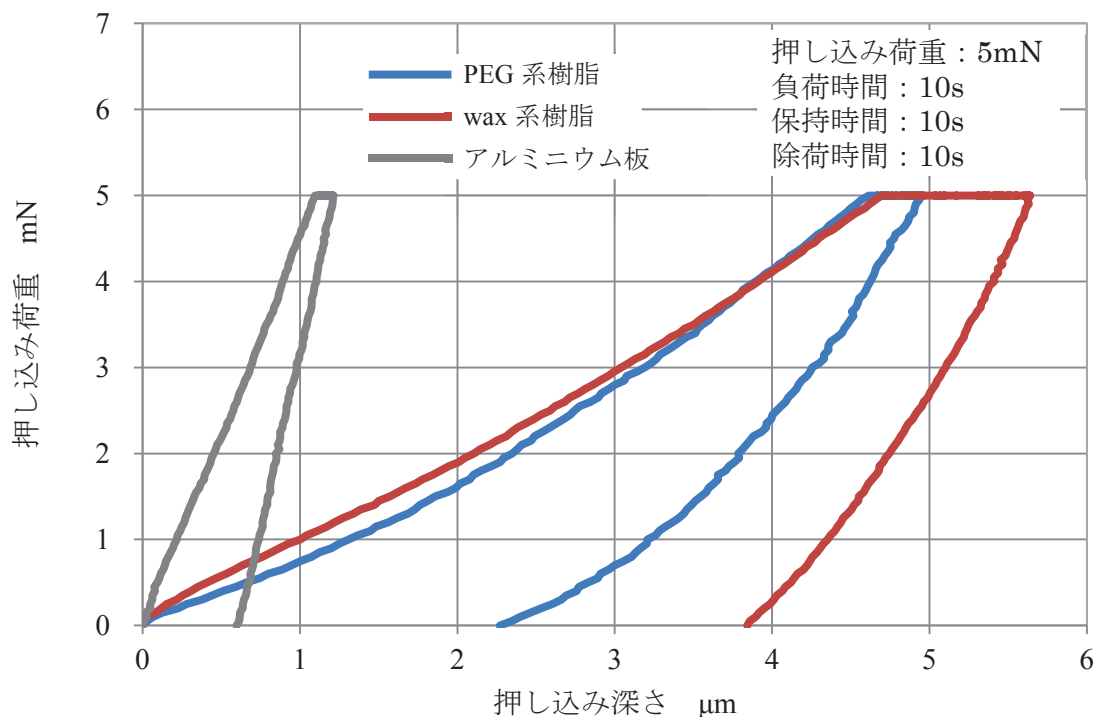


図 4-6 樹脂とアルミニウム板の硬さ特性

比較対象として選定した PEG 系樹脂と wax 系樹脂の熱特性を、示差走査熱量計（(株)島津製作所製：DSC60）で分析した結果を図 4-7 に示す。図 4-7 より、PEG 系樹脂は融点が約 60℃であり、wax 系樹脂は融点が約 80℃であることがわかる。また、熱容量で比較すると PEG 系樹脂のほうが wax 系樹脂よりも大きい。

4.2.4.3 エントリーシート樹脂部の潤滑特性

樹脂付きエントリーシートのドリル加工では、エントリーシート樹脂部がドリルに巻き付き、その樹脂が切削熱により溶解することでドリル表面に潤滑膜が形成され、切りくずの排出性が向上すると考えられている。そのため、使用する樹脂の潤滑特性を把握しておく必要があり、図 4-8 に示すボールオンディスク型摩擦摩耗試験機で潤滑特性の測定を行った。

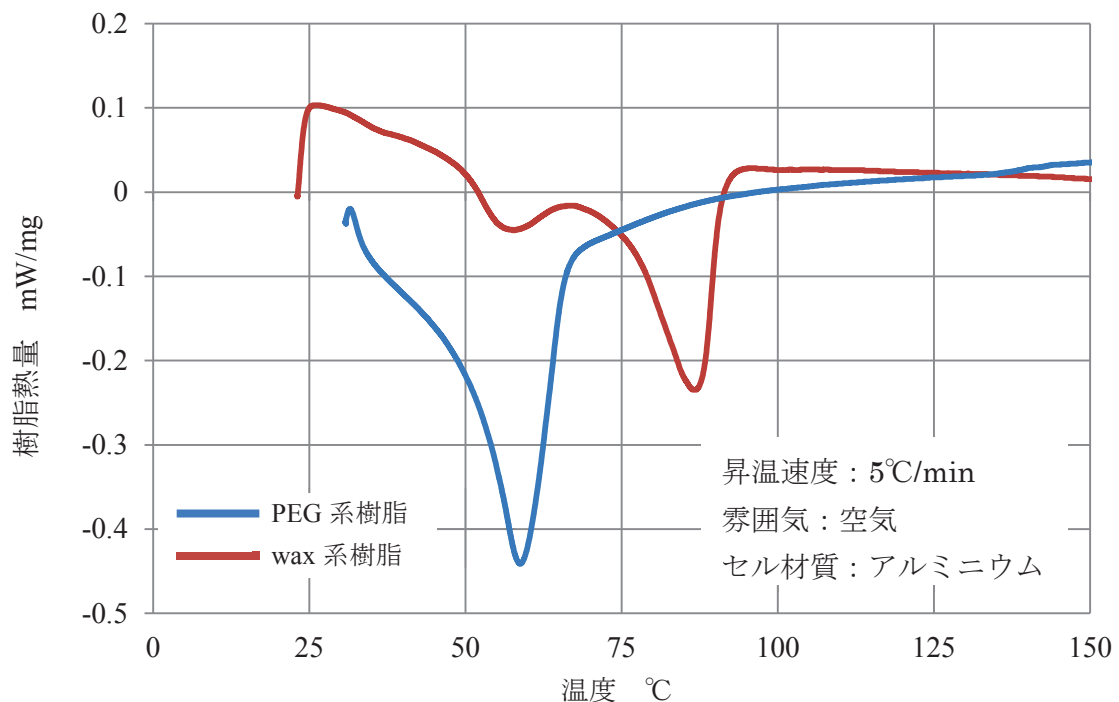


図 4-7 樹脂の熱溶解特性

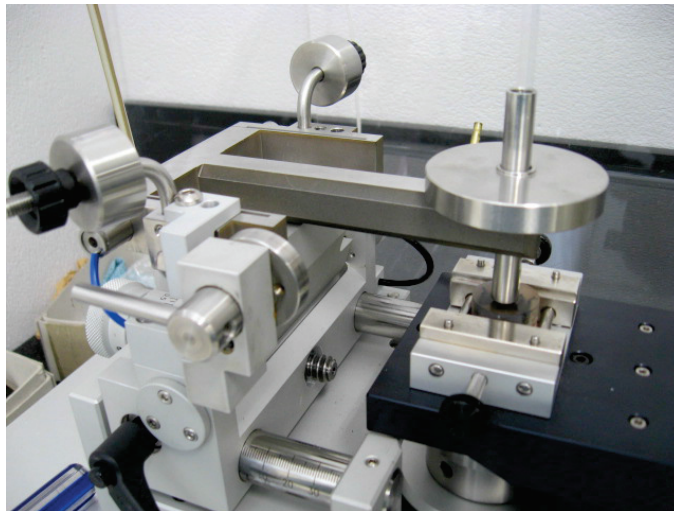


図 4-8 摩擦摩耗試験装置

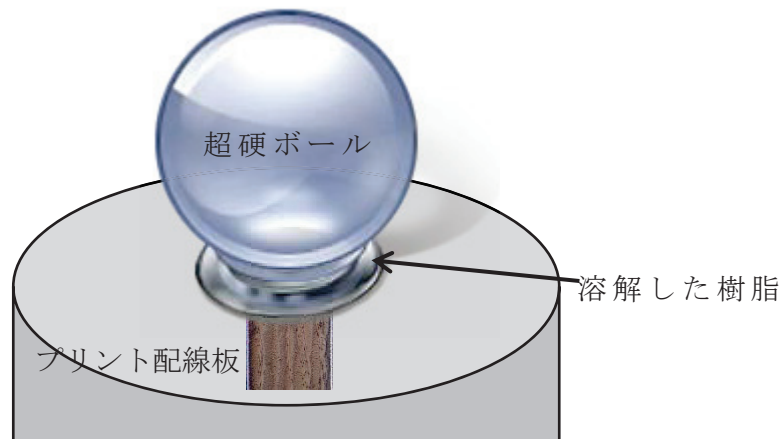


図 4-9 樹脂の潤滑特性評価方法

表 4-2 摩擦摩耗の試験条件

負荷荷重	2N
ストローク	10mm
測定速度	10mm/s
サイクル数	100cycle
ボール径	6mm
雰囲気温度	20℃
湿度	35%

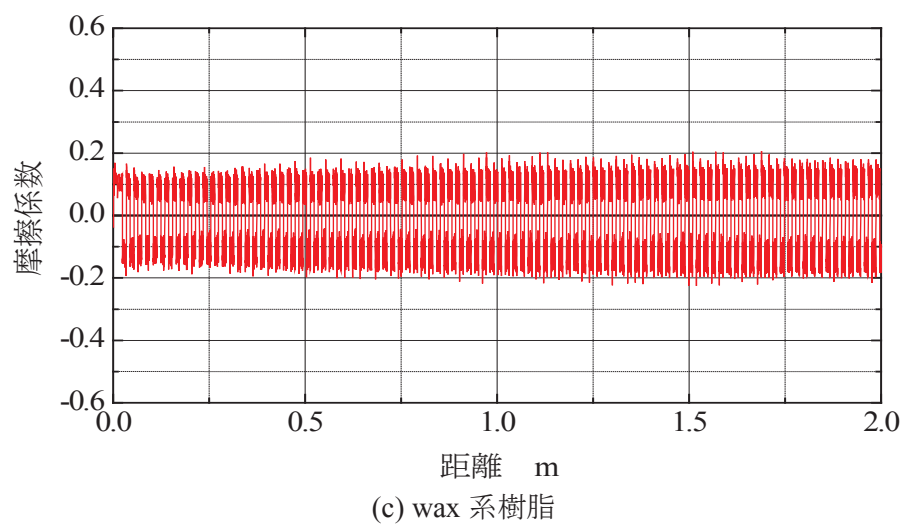
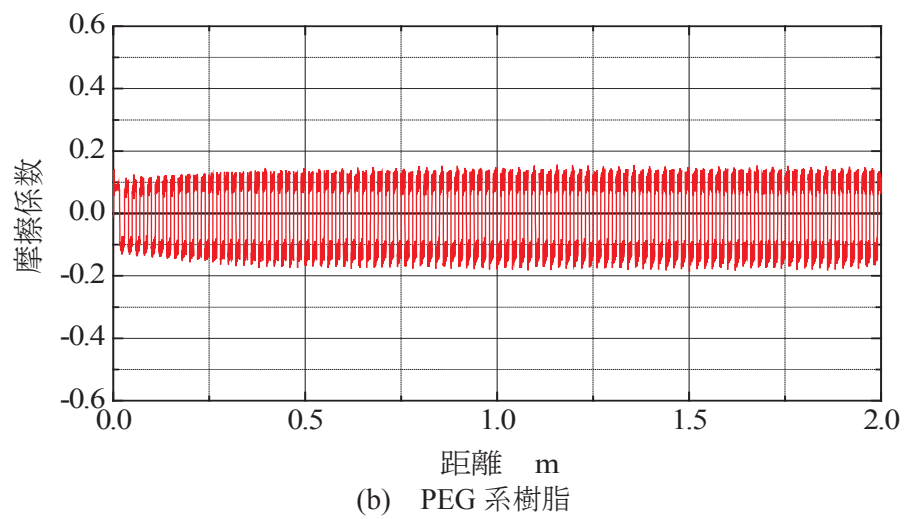
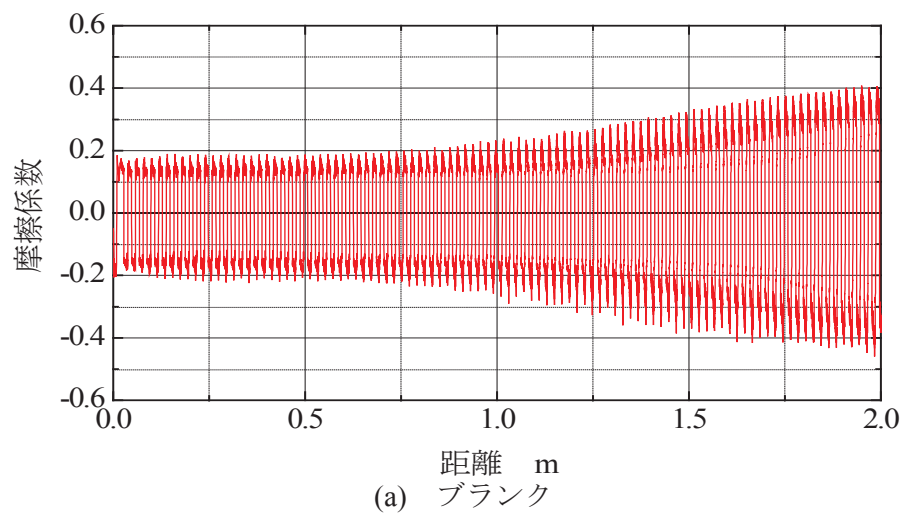


図 4-10 各エントリーシートにおける摩擦距離と摩擦係数の関係

プリント配線板の穴加工温度と同程度の約 200℃まで加熱した超硬合金製のボールを樹脂付きエントリーシート上に載せ、図 4-9 に示すように樹脂が溶解した状態でプリント配線板断面と超硬ボール間の摩擦摩耗試験を行った。試験条件を表 4-2 に示す。摩擦距離と摩擦係数の関係を図 4-10 に示す。なお、試験は往復運動における摩擦係数をグラフ化しているため、+側と-側の波形となっている。図 4-10 より、樹脂無しのブランク材の摩擦係数は測定距離が約 1m から徐々に大きくなっているが、樹脂を塗布したエントリーシートの摩擦係数は、試験距離である測定距離 2m までは大きな変化はなかった。また、摩擦係数は PEG 系樹脂のほうが wax 系樹脂よりも若干小さいことがわかる。

4.3 実験結果および考察

4.3.1 穴位置精度に及ぼす wax 配合割合の影響

4.1 節で述べたように、エントリーシートには水溶性の樹脂が使われてきたが、そのほとんどが PEG 系樹脂である。最近、著者らによって wax 系樹脂も開発されたが、wax 系樹脂は単体では塗布することができず、高分子系の樹脂と混合することにより膜形成が可能となる。そこで、高分子系樹脂に wax を 0%、6%、17.6%、39%、65.8%及び 86.6%添加したエントリーシートを使って穴加工試験を行った。穴位置精度の測定結果を図 4-11 に、スラストの測定結果を図 4-12 に示す。図 4-11 より、wax 添加量が 17.6%のエントリーシートが最も穴位置精度が良好であることがわかる。また、スラストは wax の添加により大きく低下し、その添加量が増えるほどスラストが低下することがわかる。そこで本研究では、wax 添加量が 17.6%の樹脂を wax 系樹脂として使用することにする。

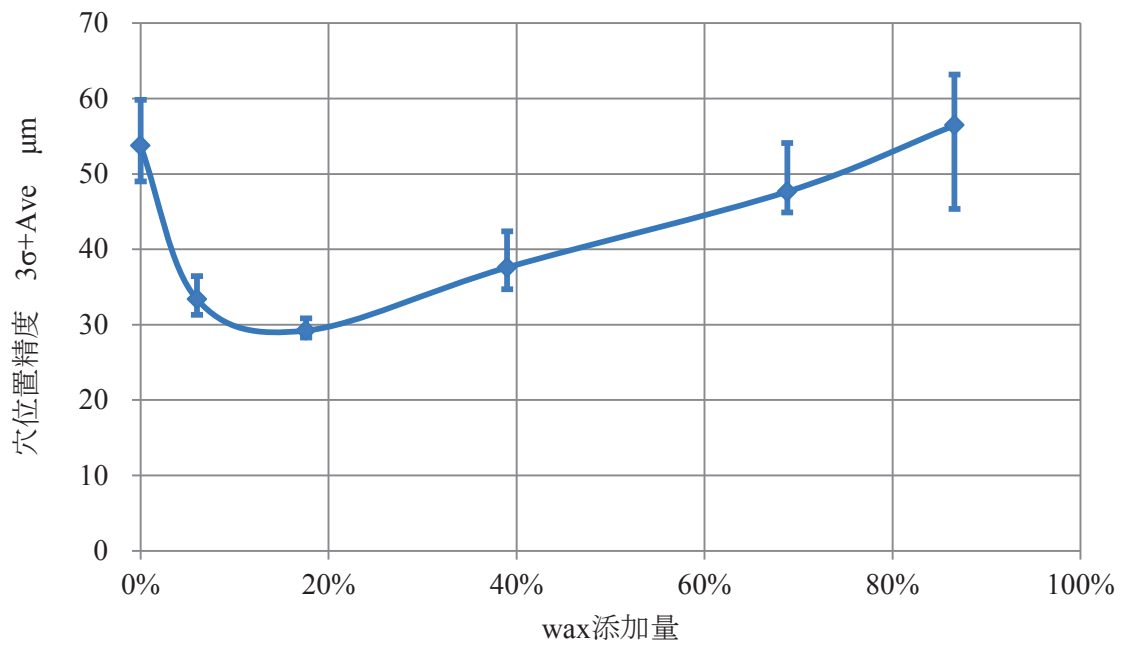


図 4-11 穴位置精度に及ぼす wax 添加量の影響

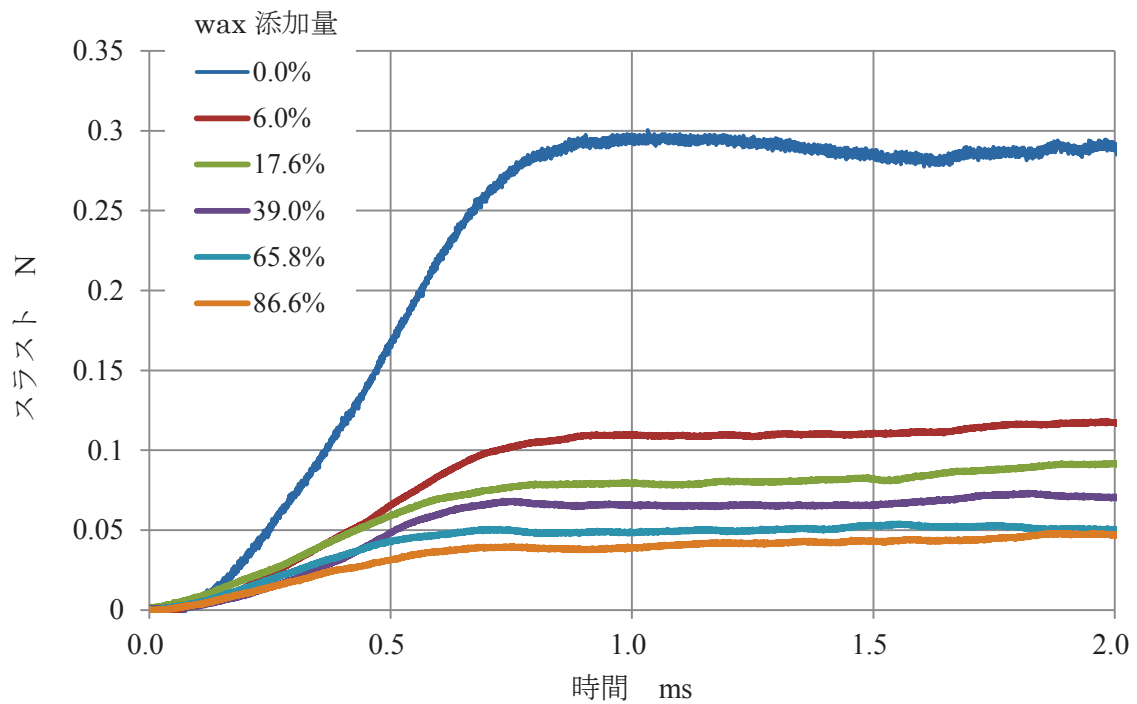


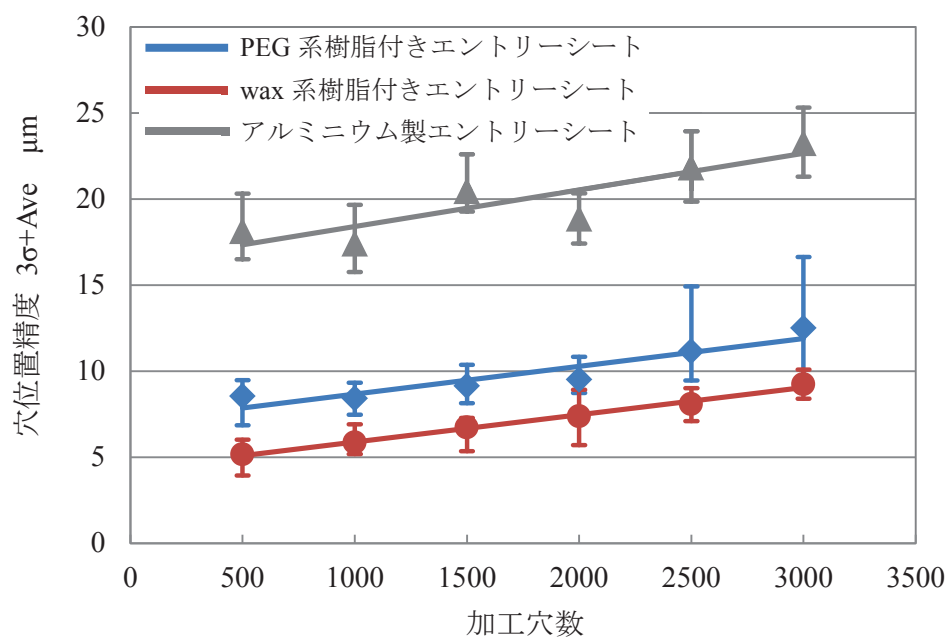
図 4-12 スラストに及ぼす wax 添加量の影響

4.3.2 穴位置精度に及ぼすエントリーシート樹脂材料の影響

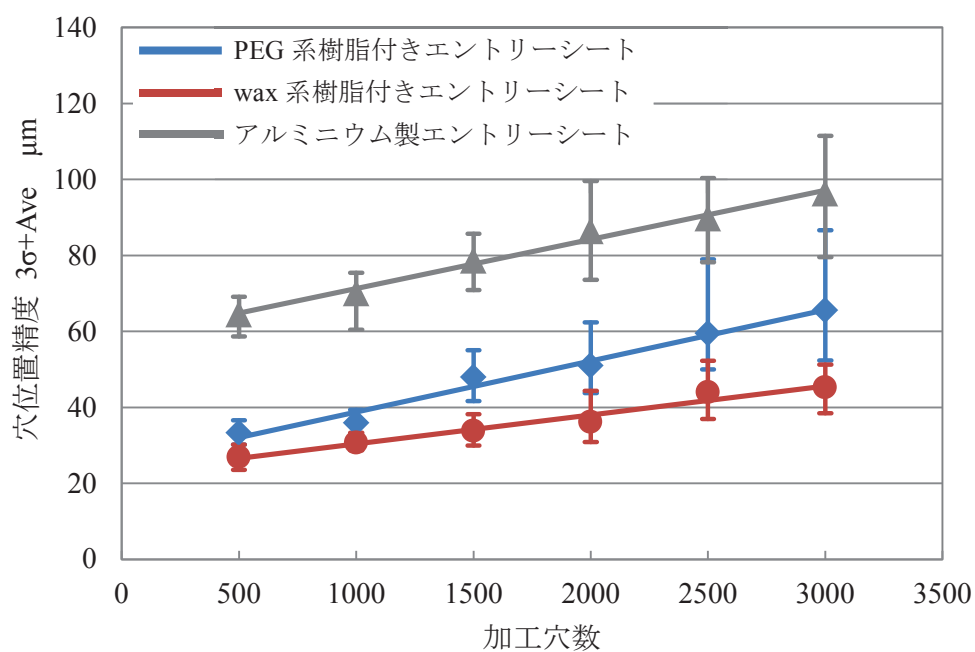
3 種類のエントリーシートを使ってプリント配線板を実験条件②で加工し、穴位置精度を評価した。図 4-13(a)にエントリーシート裏面の穴位置精度を、図 4-13(b)にプリント配線板最下面の穴位置精度を示す。なお、実験は 6 回の加工実験と穴位置精度の測定を繰り返した。図 4-13 より、加工穴数の増加によりエントリーシート裏面、プリント配線板最下面とも穴位置精度が徐々に悪化しており、各エントリーシートとも同様の傾きで推移していることがわかる。また、プリント配線板最下面ではエントリーシート裏面に比べ、穴位置精度が約 5 倍悪化している。樹脂付きエントリーシートにより穴位置精度が大幅に改善されており、特に wax 系樹脂付きエントリーシートを用いた場合のほうが良好である。また、データのバラつきについても wax 系樹脂付きエントリーシートのほうが小さいことがわかる。これは、穴位置精度に樹脂の硬さ特性が影響しているためと考えられる。

4.3.3 穴位置精度に及ぼす実験条件およびエントリーシート樹脂材料の影響

送り量を一定 ($7.5\mu\text{m}/\text{rev}$) とし、切削速度を $75\text{m}/\text{min}$, $85\text{m}/\text{min}$, $98.9\text{m}/\text{min}$, $113\text{m}/\text{min}$ および $127\text{m}/\text{min}$ の 5 条件で加工した場合の PEG 系樹脂付きエントリーシートと wax 系樹脂付きエントリーシートの裏面の穴位置精度を計測した。穴位置精度と切削速度の関係を図 4-14 に示す。図 4-14 より、全ての切削速度において wax 系樹脂付きエントリーシートのほうが良好であることがわかる。また、PEG 系樹脂付きエントリーシートは、5 つの条件の中で切削速度が $98.9\text{m}/\text{min}$ のときに穴位置精度が最も悪く、wax 系樹脂付きエントリーシートは、5 条件の中で切削速度



(a) エントリーシート裏面



(b) プリント配線板最下面

図 4-13 穴位置精度に及ぼす樹脂特性の影響

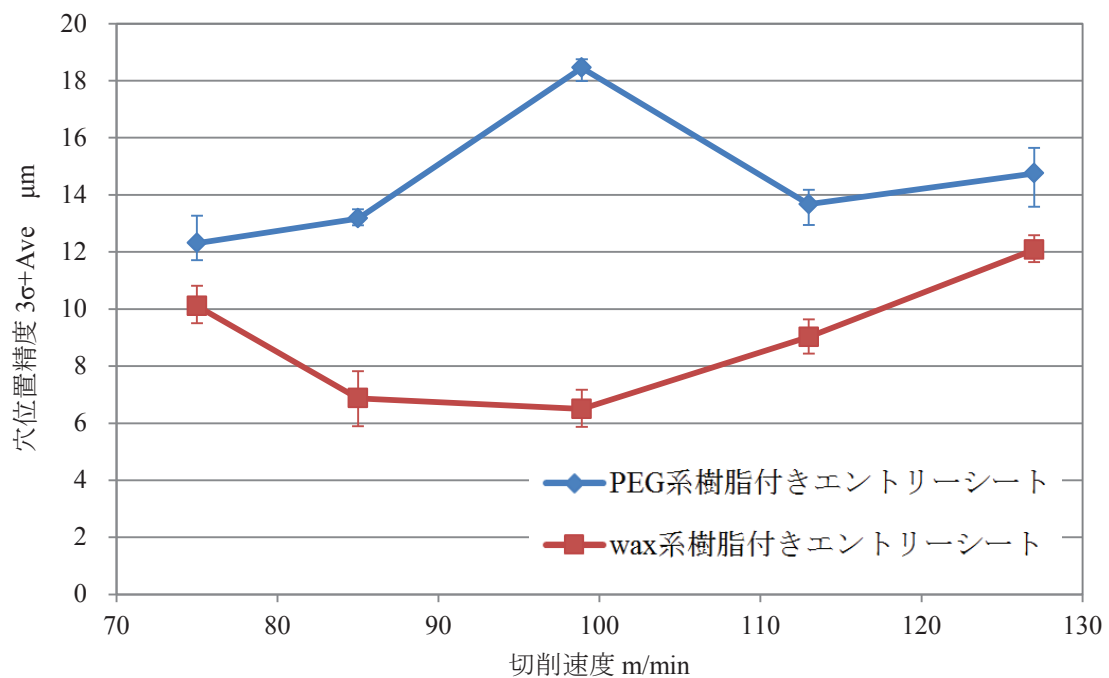
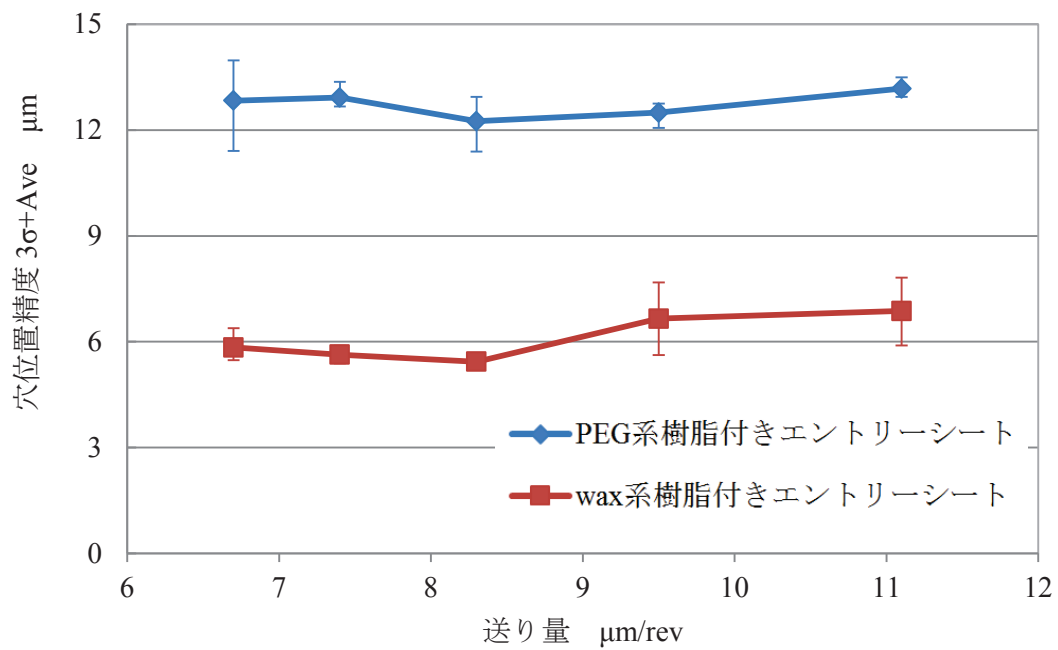


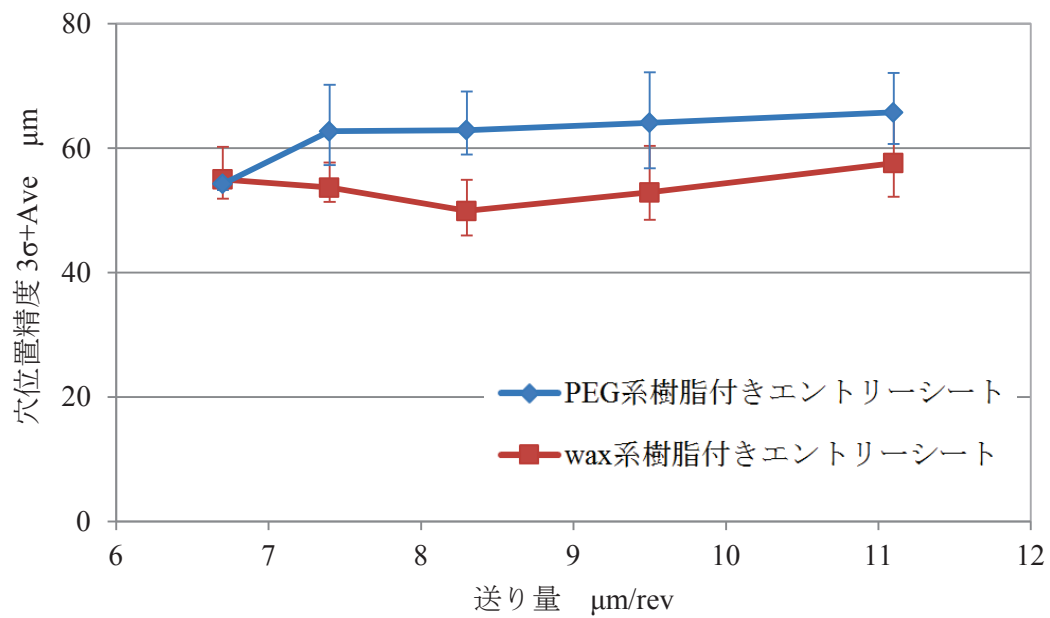
図 4-14 エントリーシート裏面の穴位置精度に及ぼす切削速度の影響

98.9m/min が最も良好であった．2つのエントリーシートにおける穴位置精度を比較すると，98.9m/min より低い切削速度と高い切削速度では差が小さくなることがわかる．

送り速度一定で回転速度を変化させることで送り量を $6.7\mu\text{m/rev}$ ， $7.4\mu\text{m/rev}$ ， $8.3\mu\text{m/rev}$ ， $9.5\mu\text{m/rev}$ および $11.1\mu\text{m/rev}$ とした 5 条件で加工した場合のエントリーシート裏面の穴位置精度を図 4-15(a)に，プリント配線板最下面の穴位置精度を図 4-15(b)に示す．図 4-15 より，エントリーシート裏面の穴位置精度は，切削速度の場合と同様に全ての送り量において PEG 系樹脂付きエントリーシートの場合より wax 系樹脂付きエントリーシートの場合のほうが良好であることがわかる．プリント配線板最下面における 2つのエントリーシートの差も同様の傾向であるが，差は小さい．



(a) エントリーシート裏面



(b) プリント配線板最下面

図 4-15 穴位置精度に及ぼす送り量の影響

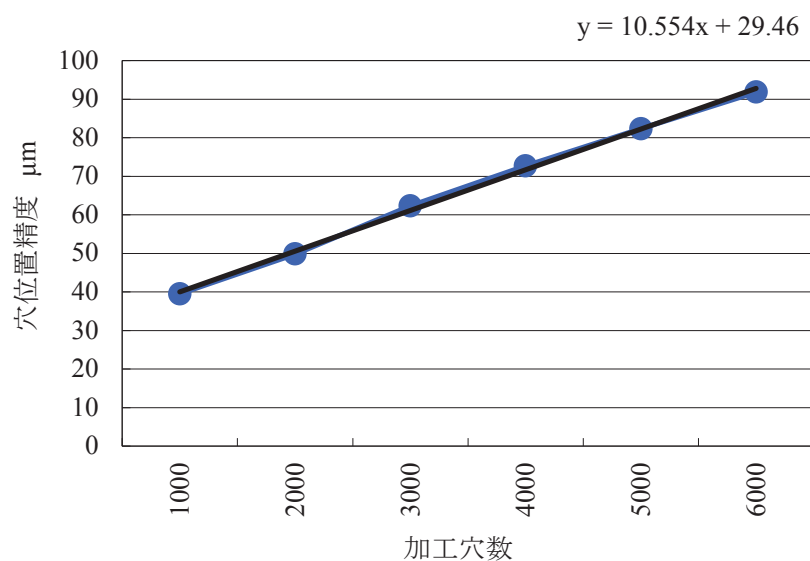


図 4-16 加工穴数と穴位置精度の関係

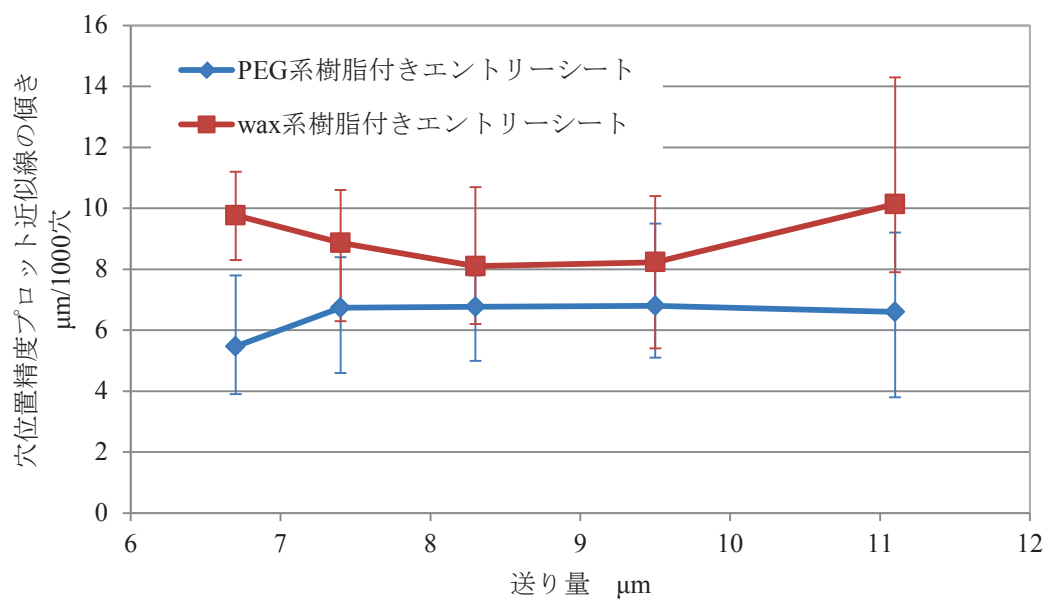


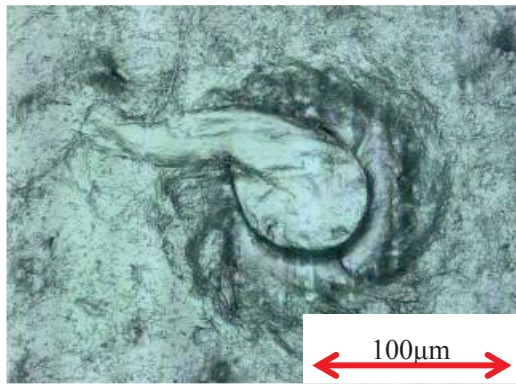
図 4-17 穴位置精度プロット近似線の傾きと送り量の関係

ここで、加工穴数の増加に伴う穴位置精度について調べた。例えば、送り量が $6.7\mu\text{m}/\text{rev}$ における加工穴数と穴位置精度の関係は図 4-16 に示すような結果となる。図中に示すようにグラフを直線近似した場合の傾

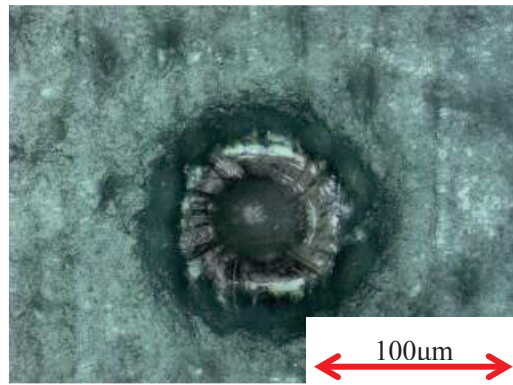
きと切片を求めることができる．そこで，実験を行ったすべての送り量と傾きの関係を図 4-17 に，送り量と切片の関係を図 4-18 に示す．図 4-17 および図 4-18 より，傾きは全ての送り量に対して wax 系樹脂付きエントリーシートよりも PEG 系樹脂付きエントリーシートのほうが小さく，切片はその逆である．このことは，加工初期は wax 系樹脂付きエントリーシートのほうが良好であるが，加工穴数の増大にともなって，穴位置精度は PEG 系樹脂付きエントリーシートよりも wax 系樹脂付きエントリーシートのほうが悪化しやすいことを意味している．

4.3.4 エントリーシート加工中の樹脂部表面状態

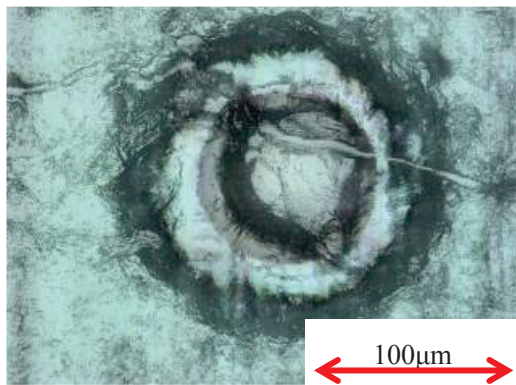
膜厚 40 μm で樹脂を塗布したエントリーシートに対し，加工深さを 20 μm ，30 μm および 50 μm とした場合の穴底面状態を観察した．PEG 系樹脂の穴底面状態を図 4-19(a),(b),(c) に示す．また，wax 系樹脂の穴底面状態を図 4-20(a),(b),(c) に示す．なお，それぞれ新品ドリルと 2000 穴加工後の摩耗ドリルを用いて実験を行った．図 4-19 および図 4-20 より，PEG 系樹脂はドリルの回転軌跡が不明瞭なのに対し，wax 系樹脂は加工面にドリル先端の回転軌跡がきれいに転写されていることがわかる．また，PEG 系樹脂は糸を引いたような痕跡から，ドリルに樹脂がまとわりつきやすい特性をもっていると考えられる．一方，wax 系樹脂は糸を引くような痕跡はなく，良好に切削されている．



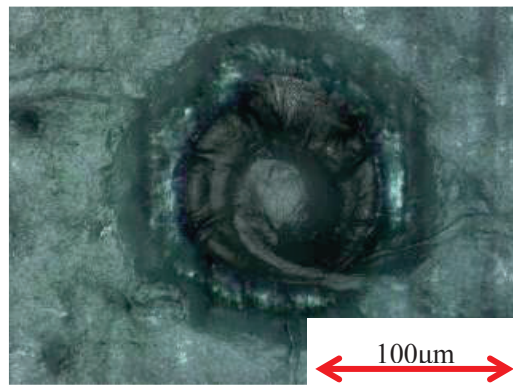
(a)-1 20 μ m 加工後 (新品ドリル)



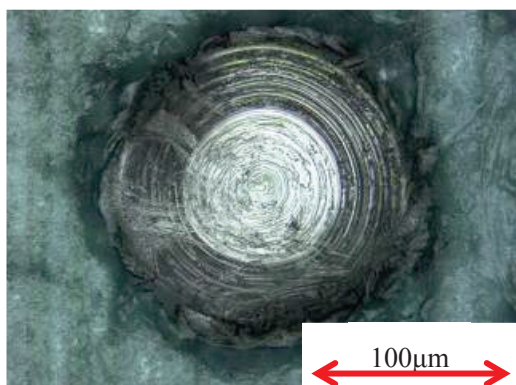
(a)-2 20 μ m 加工後 (摩耗ドリル)



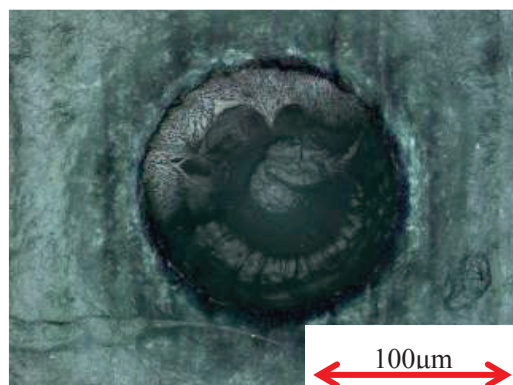
(b)-1 30 μ m 加工後 (新品ドリル)



(b)-2 30 μ m 加工後 (摩耗ドリル)

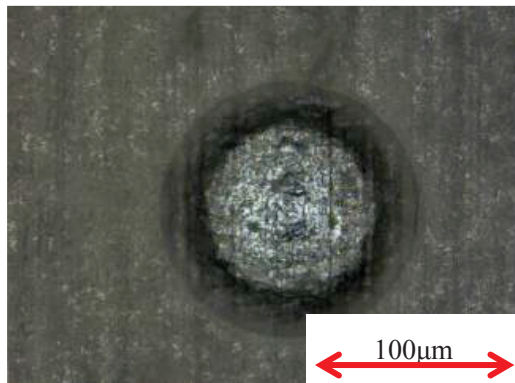


(c)-1 50 μ m 加工後 (新品ドリル)

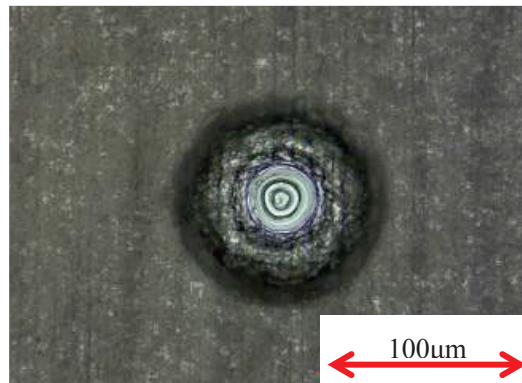


(c)-2 50 μ m 加工後 (摩耗ドリル)

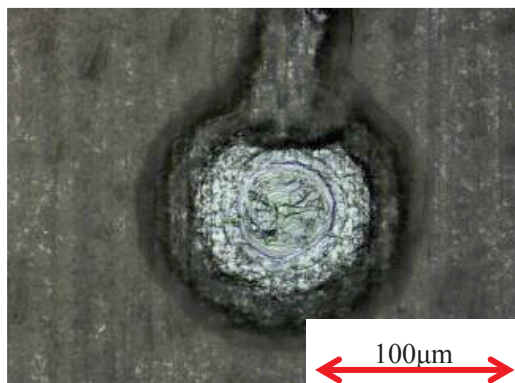
図 4-19 PEG 系樹脂加工後の表面状態



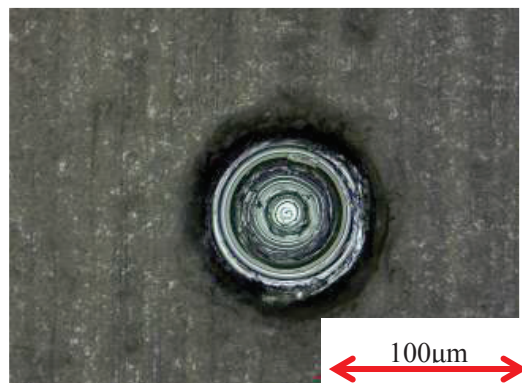
(a)-1 20 μ m 加工後 (新品ドリル)



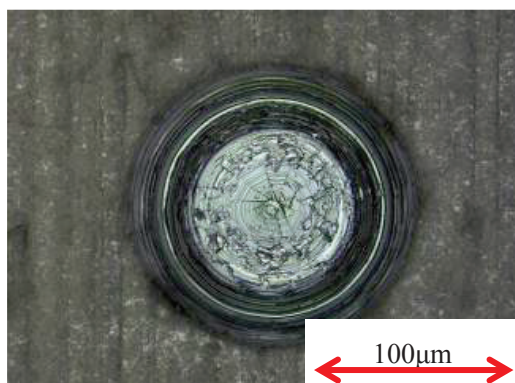
(a)-2 20 μ m 加工後 (摩耗ドリル)



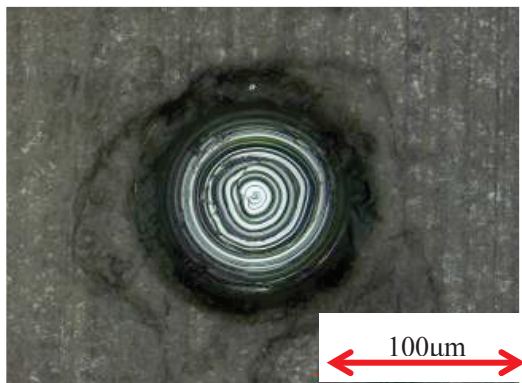
(b)-1 30 μ m 加工後 (新品ドリル)



(b)-2 30 μ m 加工後 (摩耗ドリル)



(c)-1 50 μ m 加工後 (新品ドリル)



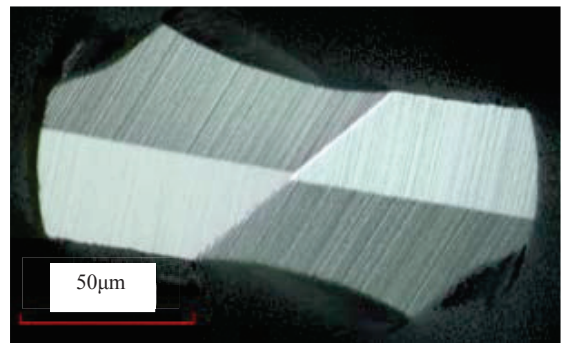
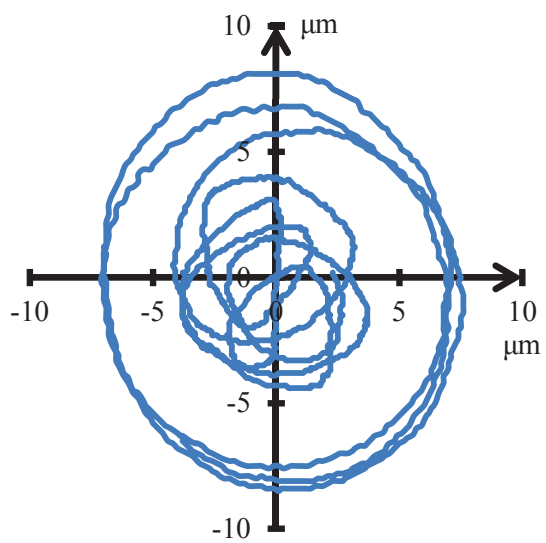
(c)-2 50 μ m 加工後 (摩耗ドリル)

図 4-20 wax 系樹脂加工後の表面状態

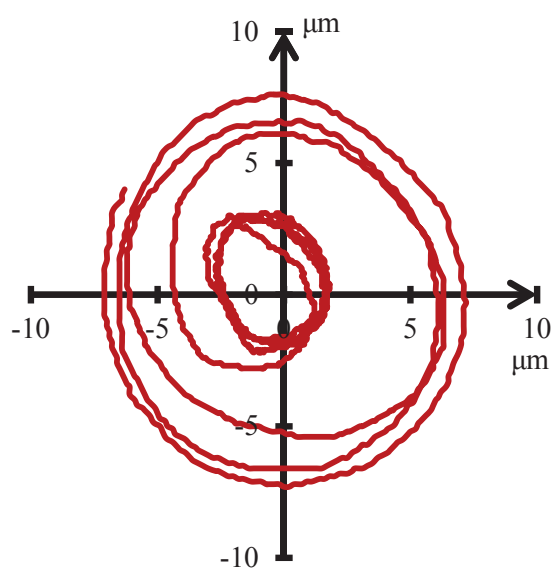
4.3.5 エントリーシート加工中のドリル先端挙動

樹脂付きエントリーシート加工時の求心性の違いを調べるため、ドリル先端の移動軌跡を計測した。エントリーシートは、PEG 系樹脂付きエントリーシート、wax 系樹脂付きエントリーシートおよびアルミニウム製エントリーシートの 3 種類とした。なお、センサのセッティング上、マシニングセンタで回転速度 $20,000\text{min}^{-1}$ 、送り量 $7.5\mu\text{m/rev}$ の条件で加工を行った。図 4-21 は新品ドリルで加工した場合の移動軌跡を示し、図 4-22 は 2000 穴加工後の摩耗ドリルで加工した場合の移動軌跡を示す。この結果から、アルミニウム製エントリーシートは樹脂付きエントリーシートと比較して回転中心から外れた位置に収束していることがわかる。特に摩耗ドリルでは、その傾向が顕著である。それに対して、樹脂付きエントリーシートは摩耗しても主軸回転中心に向かって求心している。

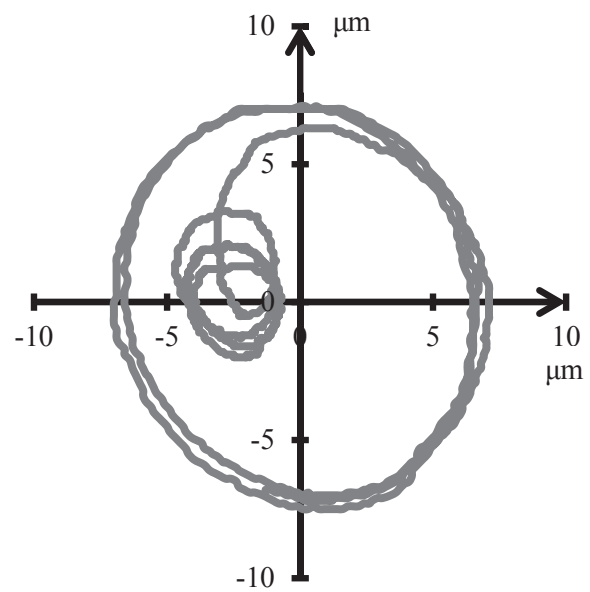
PEG 系樹脂付きエントリーシートでは、工具摩耗に関係なく振れ回り中に円運動とは異なる動きをしている。それに対し、wax 系樹脂付きエントリーシートでは、振れ回り中も回転中心に対し、ほぼ円を描いていることがわかる。図 4-19 と図 4-20 の加工後の穴底面状態の結果は、上記のようにドリル先端が PEG 系樹脂部加工中には乱れ、wax 系樹脂加工時には乱れなかったことが要因と考えられる。



(a) PEG 系樹脂付きエントリーシート

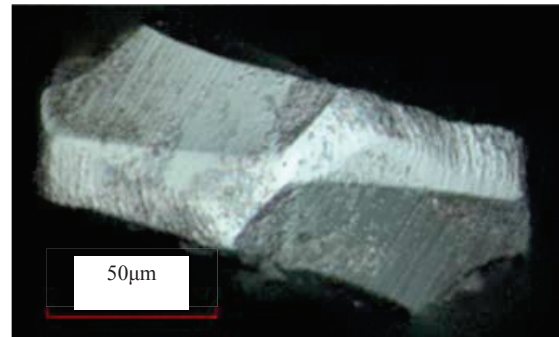
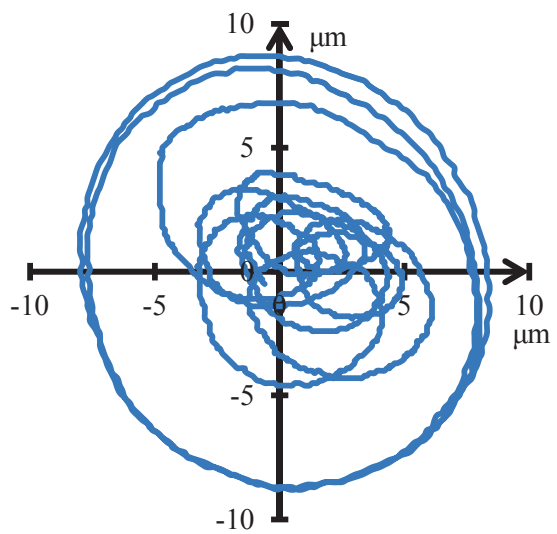


(b) wax 系樹脂付きエントリーシート

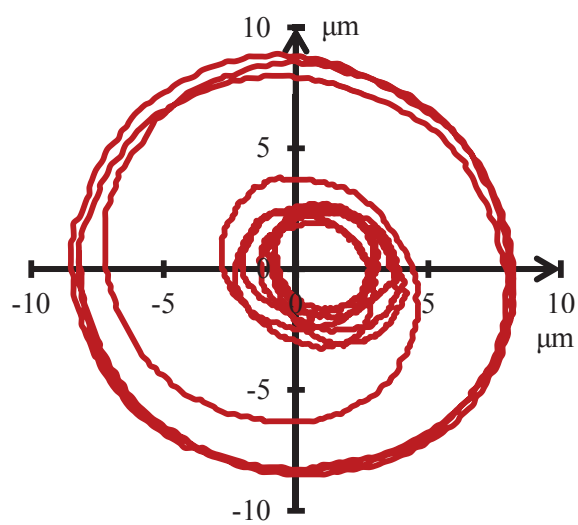


(c) アルミニウム製エントリーシート

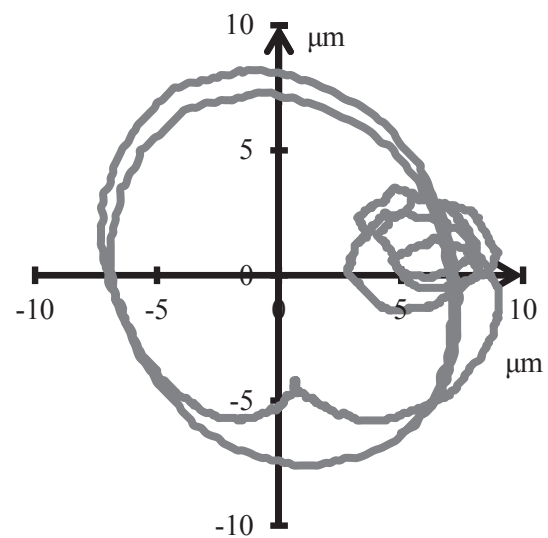
図 4-21 各エントリーシートに対する新品ドリルの求心性



(a) PEG 系樹脂付きエントリーシート



(b) wax 系樹脂付きエントリーシート



(c) アルミニウム製エントリーシート

図 4-22 各エントリーシートに対する摩耗ドリルの求心性

4.3.6 エントリーシート加工中の切削力

エントリーシート加工時に発生するスラストとトルクを計測した。スラストの測定には切削動力計（㈱日本キスラー：センサ 9317B，アンプ 5019B）を，トルクの測定にはトルクセンサ（㈱日本キスラー：センサ 9329A，アンプ 5019B）を用いた。なお，トルクセンサは，センサ中心とスピンドル中心を同軸にセッティングする必要があるため，機上でタッチプローブ（(株)レニショー：OMP60）による位置決めが可能なマシニングセンタを用いて加工を行った。実験条件②（主軸回転速度 $300,000\text{min}^{-1}$ ，送り量 $7.5\mu\text{m}$ ）で加工した場合のスラストを図 4-23 に，主軸回転速度 $54,000\text{min}^{-1}$ ，送り量 $5.5\mu\text{m}/\text{rev}$ で加工した場合のトルクを図 4-24 に示す。なお，図中の点線部までがエントリーシートの樹脂部を加工中の波形で，それ以降がエントリーシートのアルミニウム部を加工中の波形である。これらの図より，スラスト，トルクともにアルミニウム製エントリーシ

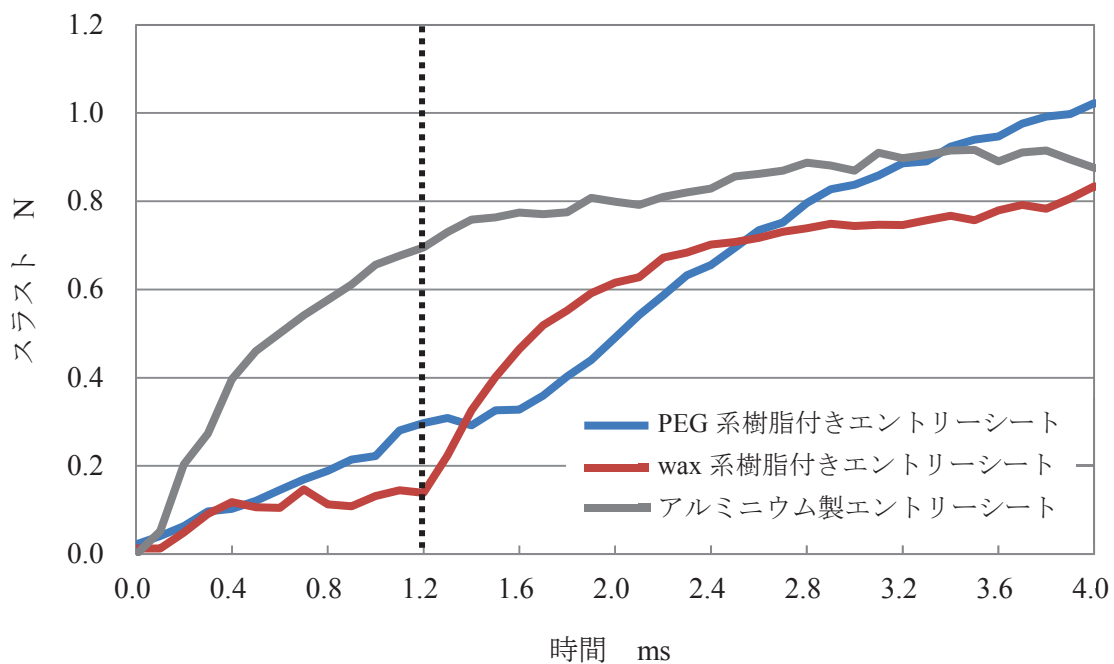


図 4-23 スラストに及ぼす樹脂特性の影響

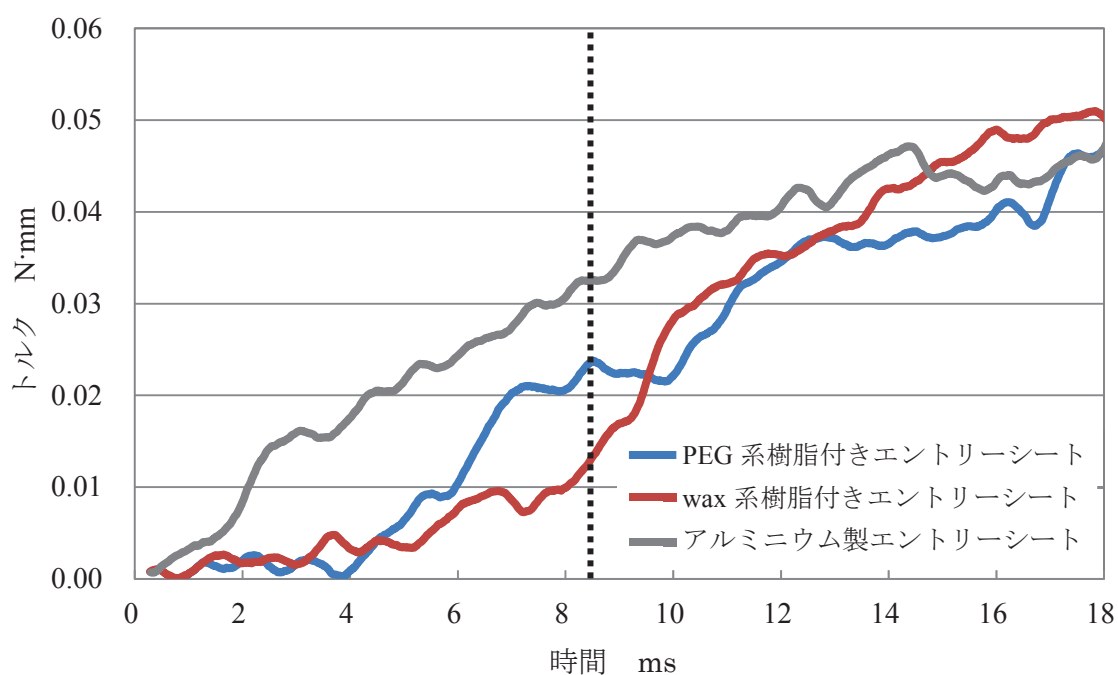


図 4-24 トルクに及ぼす樹脂特性の影響

ート，PEG 系樹脂付きエントリーシート，wax 系樹脂付きエントリーシートの順に大きい．また，エントリーシート樹脂部の加工の後半である 8ms 付近では wax 系樹脂付きエントリーシートのスラスト，トルクは PEG 系樹脂付きエントリーシートの約 1/2 であることがわかる．これは，wax 系樹脂の硬さ特性と切削特性に起因していると考えられる．

4.4 結言

本章では，穴位置精度に及ぼすエントリーシート樹脂特性の影響について，PEG 系樹脂付きエントリーシート，wax 系樹脂付きエントリーシートおよびアルミニウム製エントリーシートを用いて調べた．得られた結果を以下に示す．

- (1) wax 系樹脂付きエントリーシートの wax 含有量は，穴位置精度に影響を及ぼす.
- (2) PEG 系樹脂より柔らかく，弾性回復性の低い wax 系樹脂は，PEG 系樹脂と比較してドリル先端食い付き時の求心性が良好であり，その結果，穴位置精度が優れる.
- (3) 切削速度 75～127m/min および送り量 6.7～11.1 μ m/rev の条件下では，wax 系樹脂付きエントリーシートの穴位置精度は PEG 系樹脂付きエントリーシートより良好である. また，加工穴数の増大にともなう穴位置精度の悪化の程度は，PEG 系樹脂付きエントリーシートより wax 系樹脂付きエントリーシートのほうが大きい.
- (4) wax 系樹脂付きエントリーシートのスラストとトルクは，PEG 系樹脂付きエントリーシートの場合に比べ，約 1/2 と小さい.

第5章 穴壁面粗さに及ぼすエントリーシート樹脂特性の影響

5.1 緒言

プリント配線板スルーホールの穴壁面に関わる代表的なトラブルは、次の4項目である。

- 穴壁面粗さの悪化
- ガラスクロス抜けによるめっき染み込み
- 内層銅箔の塑性変形によるネイルヘッドの発生
- 絶縁材料の樹脂溶融にともなうレジンスミアの発生

その中で穴壁面粗さの悪化は、めっきの膜厚が薄くなり、熱膨張時に電氣的な断線を引き起こす要因となる。穴壁面粗さは、穴加工時の切削温度の上昇や切りくずの排出不良によって増大するものと考えられている。

穴壁面粗さの改善方法の一つとして、樹脂付きエントリーシートによる加工があるが、樹脂付きエントリーシートの効果に関する報告は少なく、廣垣らによる赤外線サーモグラフィを用いた小径穴あけ時のドリル温度モニターに関する研究⁵⁻¹⁾がある程度である。しかし、この研究では、樹脂付きエントリーシートの切削温度低減効果を確認した程度であり、樹脂材料による違いまでは検証されていない。

そこで本章では、穴壁面粗さに及ぼす樹脂付きエントリーシートの樹脂材料の影響を調べた。

5.2 実験方法および実験条件

第4章で述べたPEG系樹脂付きエントリーシート、wax系樹脂付きエントリーシートおよびアルミニウム製エントリーシートを用いてプリン

ト配線板に穴加工を行い，穴壁面粗さを調べた．穴壁面粗さの測定方法は，2.2.3 項と同じである．

また，エントリーシートの樹脂には潤滑作用があるため，穴加工時にドリルのフルート部に樹脂が巻き付くと切りくず排出性が向上し，さらに樹脂溶解による切削熱低減効果もあるとされている．そこで，本章では穴加工時の切削温度測定も行った．

切削温度の評価は，プリント配線板を貫通した直後のドリル先端温度を測定することにより行った．温度測定は，図 5-1 に示すようにドリル貫通箇所底面から上面に向けてコア系 $\phi 0.2$ の光ファイバをセットし，穴貫通直後のドリル先端から発せられる赤外線を受光して，InAs/InSb 複合 2 色素子に伝送することにより行った．温度計は，10 Hz～100 kHz までフラットな周波数応答特性を有している⁵⁻²⁾．なお，2 色素子センサは，ドリルに接触式熱電対をセットし，炉の中で温度上昇させた場合の電圧値と熱電対の温度の関係により校正を行った．

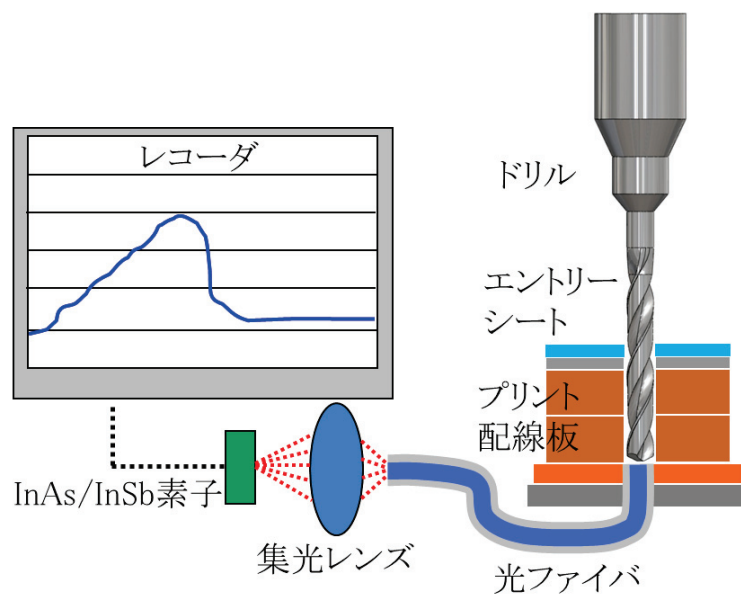


図 5-1 切削温度測定方法

5.3 実験結果および考察

5.3.1 穴壁面粗さに及ぼすエントリーシート樹脂材料の影響

図 5-2 は、3 種類のエントリーシートを用いた場合の穴壁面の凹凸の程度を示すコンター図である。なお、観察した穴壁面は、第 2 章で述べたように切りくず排出不良によって粗さに影響の出やすいドリル入口側の 1

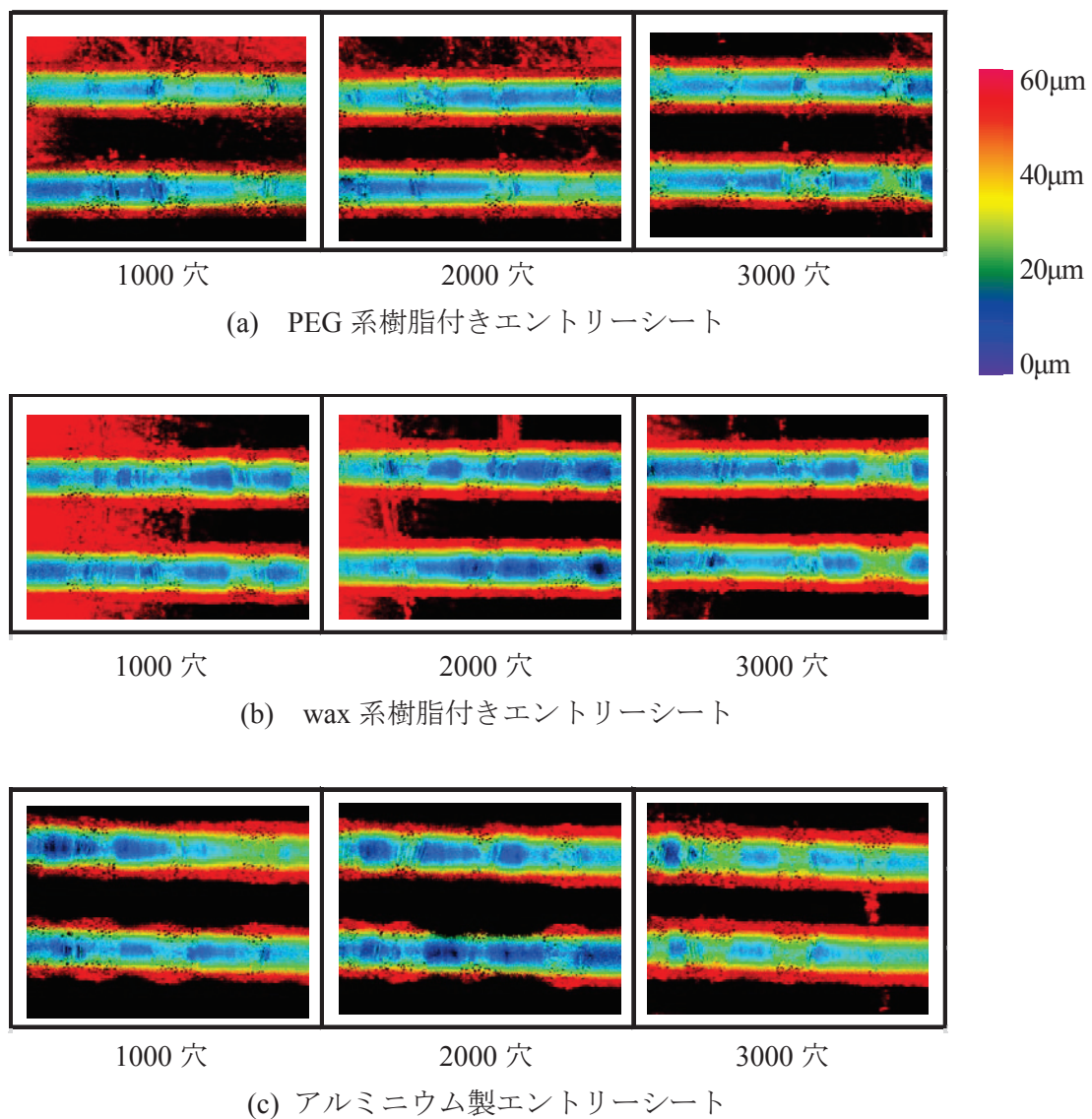


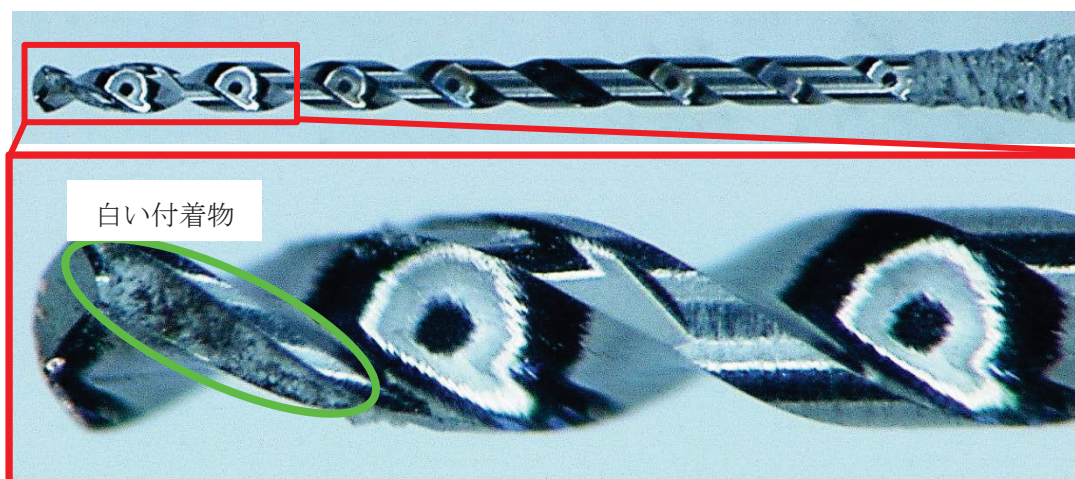
図 5-2 エントリーシートの樹脂特性と穴壁面粗さの関係

枚目のプリント配線板であり，図 5-2 には平均的な 2 穴の穴壁面の凹凸を示している．図 5-2 より，アルミニウム製エントリーシート＞wax 系樹脂付きエントリーシート＞PEG 系樹脂付きエントリーシートの順で，エポキシ樹脂層の穴壁面のくぼみ（図 2-18 参照）が多く発生していることがわかる．アルミニウム製エントリーシートは全ての穴で穴壁面のくぼみが発生しているが，wax 系樹脂付きエントリーシートは加工穴数増大とともに徐々に穴壁面のくぼみの発生箇所が増えており，PEG 系樹脂付きエントリーシートは全ての穴においてきれいな穴壁面となっていることがわかる．

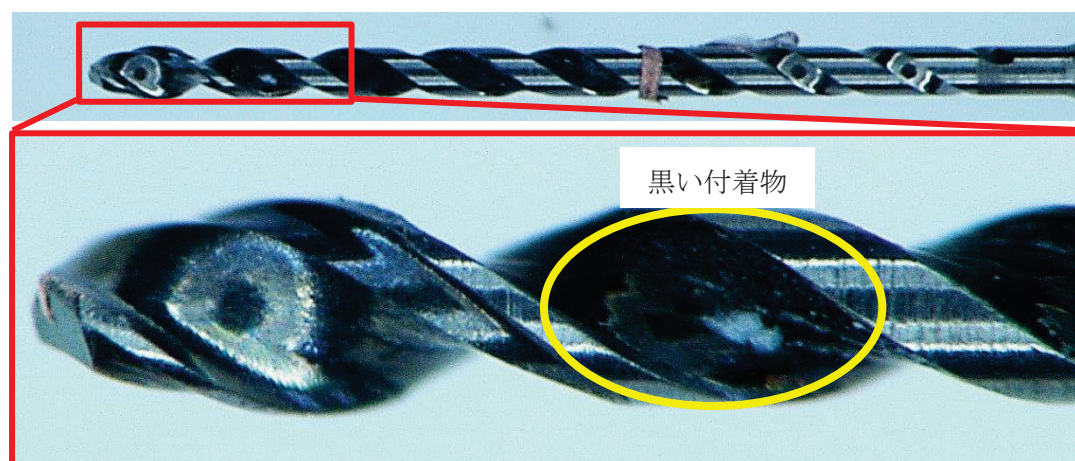
5.3.2 加工後のドリルフルート部

上述のとおり，樹脂付きエントリーシートの樹脂の効果により穴壁面のくぼみが改善されているが，その場合，ドリルのフルート部や先端部に外見上，何らかの違いが見られる．そこで，樹脂付きエントリーシートを用いて加工したドリルを観察した．図 5-3 は，加工後のドリルフルート部全体とドリル先端付近の様子を示す．図 5-3 より，PEG 系樹脂付きエントリーシートを用いて加工したドリルには，フルート部全体において光沢が見られる．一方，wax 系樹脂付きエントリーシートとアルミニウム製エントリーシートを用いて加工したドリルには，ドリルフルート部に黒い付着物が見られる．特に，アルミニウム製エントリーシートにはその傾向が顕著である．電子顕微鏡で成分分析を行ったところ，付着物は炭化物の反応を示しており，有機物が付着していることが確認できた．その付着物は，アルコールによる超音波洗浄で除去できない程，強固に付着していたことから，切削温度上昇にともなう樹脂の焦げ付きである可能性が高い．

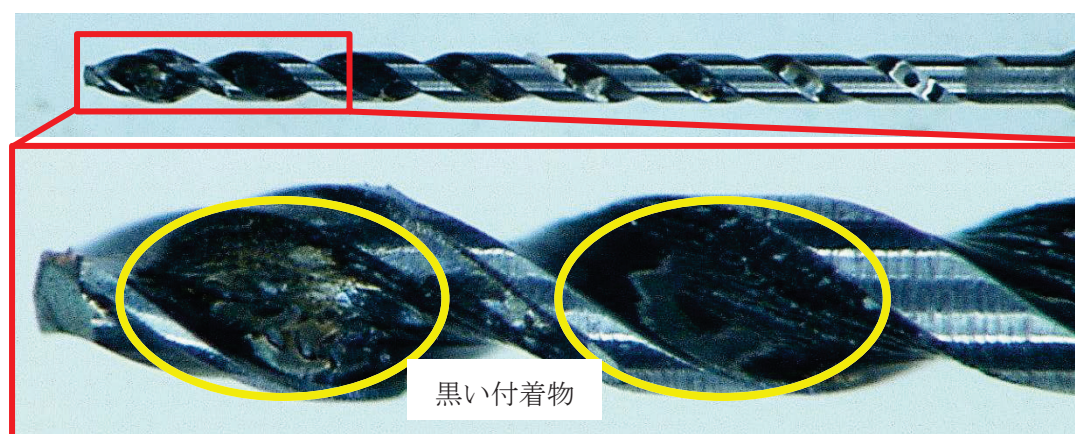
また，PEG 系樹脂付きエントリーシートを用いて加工したドリルの根元部分と二番取り面には，wax 系樹脂付きエントリーシートとアルミニウム



(a) PEG 系樹脂付きエントリーシート



(b) wax 系樹脂付きエントリーシート



(c) アルミニウム製エントリーシート

図 5-3 加工後のドリルフルート部

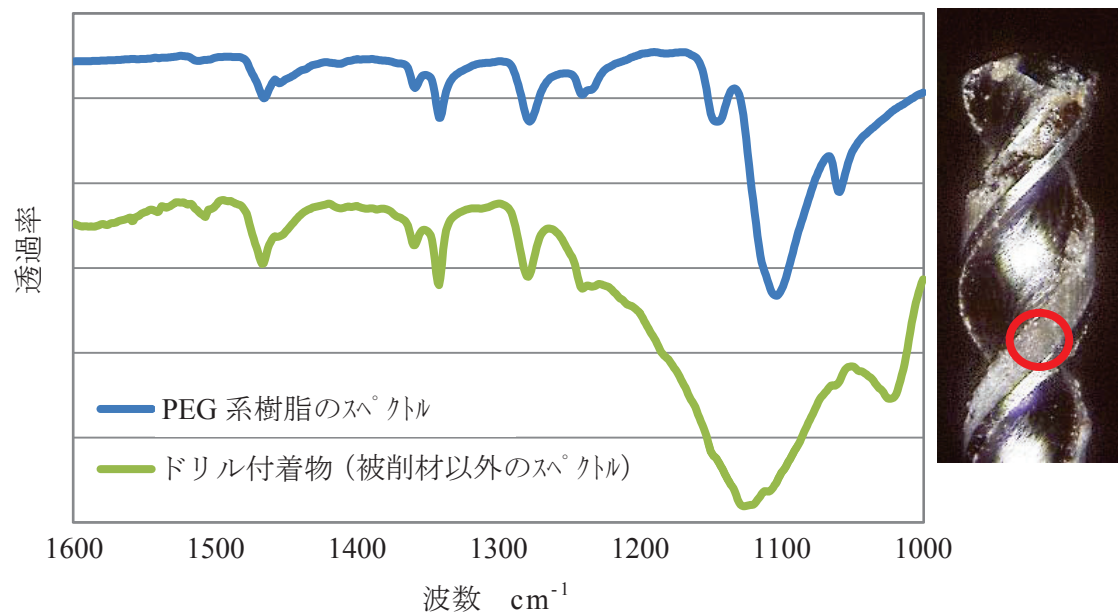
製エントリーシートには見られない粉状の白い付着物が見られた．この付着物は，PEG 系樹脂である可能性が高く，エントリーシートの樹脂がドリルにまとわりつきながら排出された結果と考えられる．

5.3.3 ドリルフルート部に付着する樹脂の効果

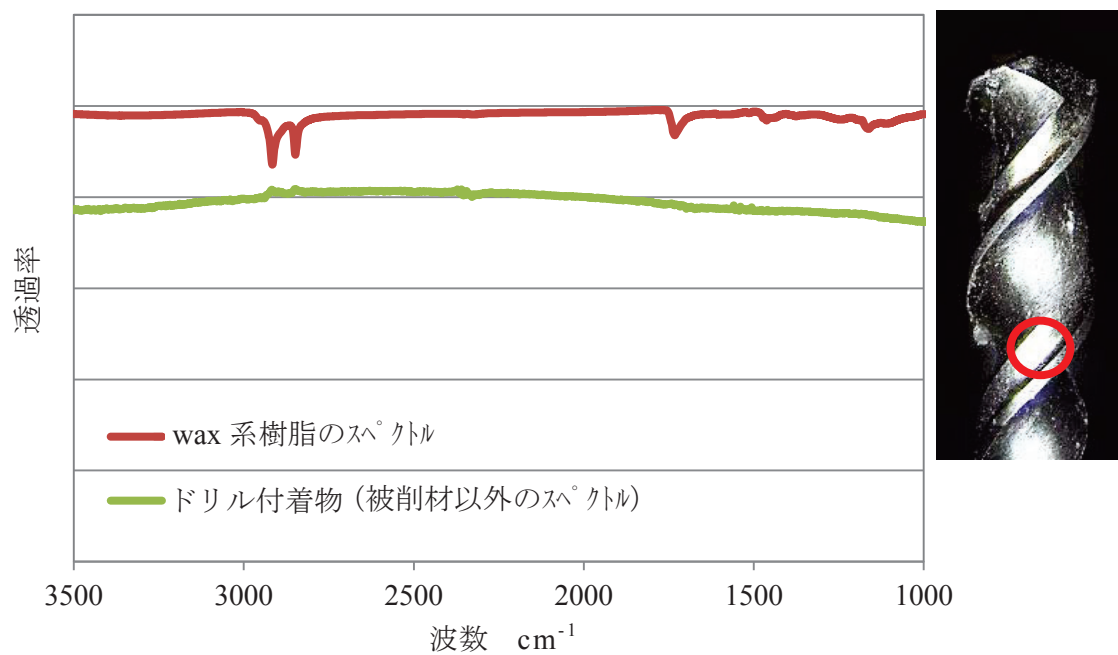
エントリーシート樹脂部がドリルに残存することでエポキシ樹脂層のくぼみ抑制効果を発揮したものと推測し，そのことを確認するため，付着物の定性分析を行った．分析は，図 5-3(a)に示す白い付着物が付いているドリルの二番取り面を赤外分光光度計 FT-IR（株）パーキンエルマージャパン：Spotlight400）で行った．なお，分析装置の最小検出スポット径が $\phi 0.1$ であるため， $\phi 0.2$ のドリルで加工（回転速度 $180,000\text{min}^{-1}$ ，送り量 $12.5\mu\text{m/rev}$ ）した場合のサンプルを分析した．分析手法は，エントリーシート，プリント配線板，バックアップボードについては減衰全反射法とし，ドリル付着物については，ドリル母材をブランクとした赤外顕微鏡による正反射法とした．

それぞれのドリルにおける二番取り面の赤外吸収スペクトルからエントリーシート樹脂部以外の被削材（アルミニウム，銅箔，絶縁材料，バックアップボード）の赤外吸収スペクトルを差し引いた波形を比較した．

PEG 系樹脂付きエントリーシートの結果を図 5-4(a)に，wax 系樹脂付きエントリーシートの結果を図 5-4(b)示す．なお，図中の赤丸が分析箇所とそのスポット径を表している．図 5-4 より，PEG 系樹脂付きエントリーシートを用いて加工したドリルには，樹脂の主成分であるポリエチレングリコール由来の強い吸収が波長 $1300\sim 1400\text{cm}^{-1}$ 付近で検出されている．



(a) PEG 系樹脂付きエントリーシート



(b) wax 系樹脂付きエントリーシート

図 5-4 ドリル付着物の赤外線スペクトル

一方、wax 系樹脂付きエントリーシートを用いて加工したドリルには wax の主成分であるカルナバロウ由来の強い吸収は検出されなかった。このことから、PEG 系樹脂付きエントリーシートではドリルに樹脂が残存しているが、wax 系樹脂付きエントリーシートでは残存していないことがわかる。残存した樹脂は、ドリルフルート部における潤滑効果の持続性向上に寄与したものと考えられる。

5.3.4 貫通直後のドリル刃先温度

上述のように、PEG 系樹脂付きエントリーシートのドリル加工では、ドリルに樹脂が残存し、切削温度が低下すると考えられる。そこで、このことを確かめるため、主軸回転速度 $300,000\text{min}^{-1}$ 、送り量 $7.5\mu\text{m/rev}$ で厚さ 1mm のプリント配線板を 3 枚重ねて $\phi 0.3$ のドリルで加工し、ドリル貫通直後の刃先温度を計測した。図 5-5 は、3 種類のエントリーシートでプリント配線板を加工した場合のドリル刃先温度を示している。図 5-5 より、いずれの場合も使用したプリント配線板のエポキシ樹脂のガラス転位点 T_g (約 200°C) 以上になっているものの、PEG 系樹脂付きエントリーシートと wax 系樹脂付きエントリーシートの使用によって、ドリル刃先温度が大幅に低下していることがわかる。図 5-2 に示したように穴壁面粗さは、PEG 系樹脂付きエントリーシート、wax 系樹脂付きエントリーシート、アルミニウム製エントリーシートの順に小さく、これは図 5-5 のドリル刃先温度の低い順と一致している。PEG 系樹脂付きエントリーシートを使った場合、融点が高い PEG 系樹脂がドリルに付着し、それが切削熱により溶解することで潤滑効果が現れ、その結果切削温度が低下し、切りくず排出性の向上につながったものと考えられる。

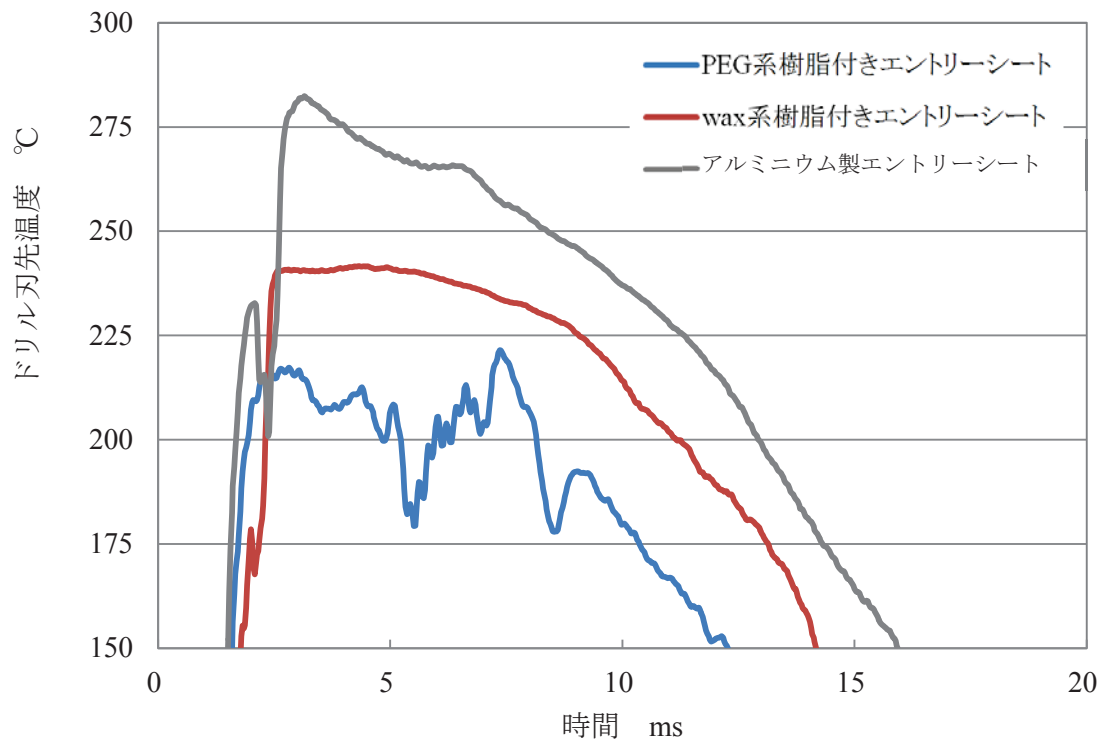


図 5-5 ドリル刃先温度に及ぼすエントリーシートの樹脂特性の影響

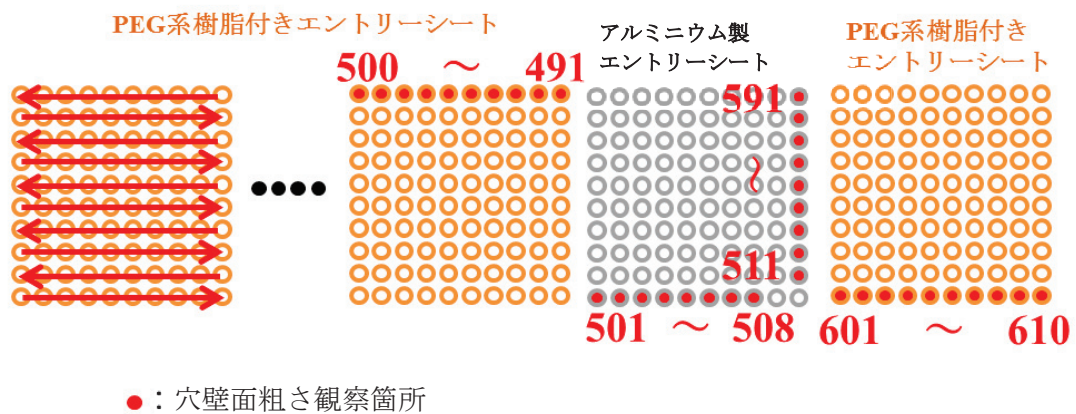
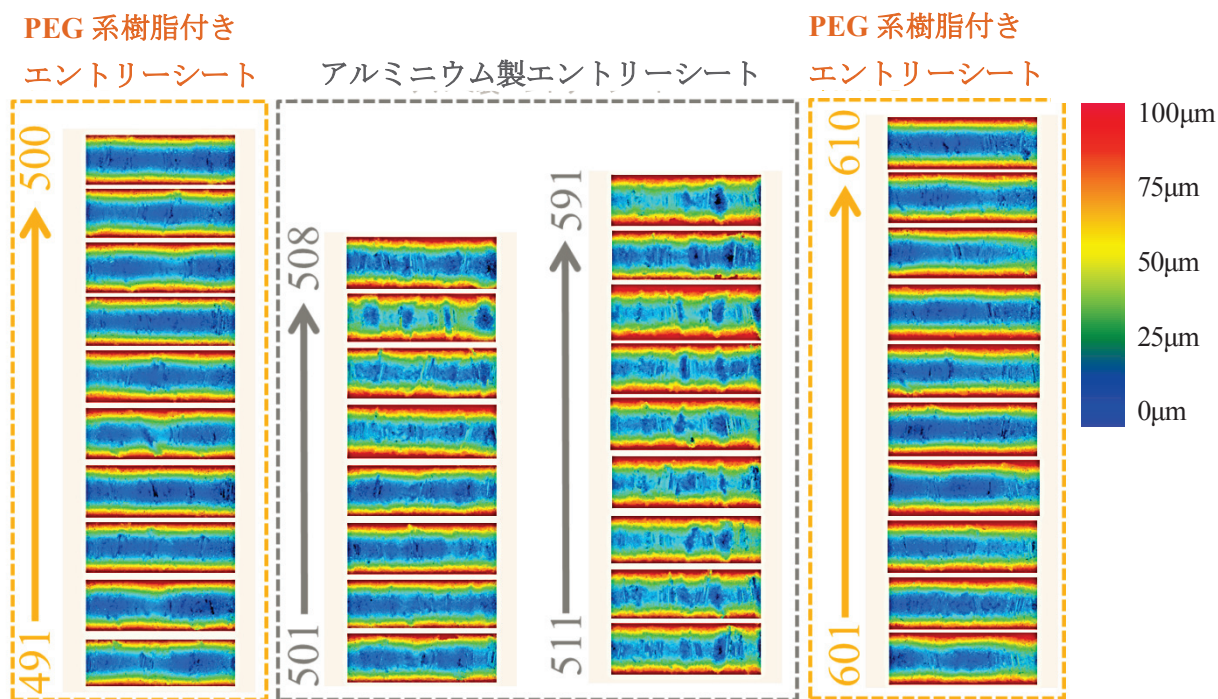


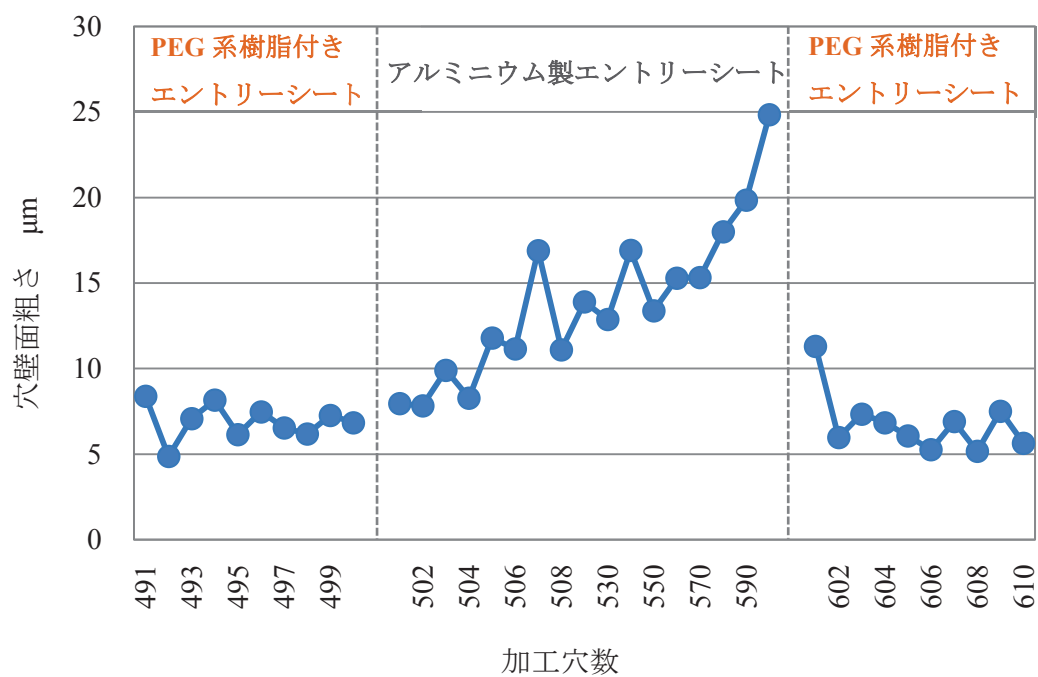
図 5-6 潤滑・冷却性能持続性評価を行う加工手順

5.3.5 エントリーシートの潤滑・冷却性能の持続性

PEG 系樹脂付きエントリーシートを使うことで、ドリルフルートへの樹脂の残存によって潤滑および冷却が持続し、穴壁面粗さが向上していると考えられる。そこで、その検証実験を行った。



(a) コンター図



(b) 穴壁面粗さ

図 5-7 穴壁面粗さ改善効果の持続性

実験には、穴壁面粗さが比較的粗くなりやすいφ0.3のドリルを使用し、樹脂厚100μmのPEG系樹脂付きエントリーシートを用いて、主軸回転速度120,000min⁻¹、送り量19μm/revで1mm厚のプリント配線板を3枚重ねて穴加工を行った。プリント配線板穴加工時の切削温度は、500穴程度の加工で定常状態になると報告されている⁵⁻³⁾。そこで、樹脂残存効果の持続性評価は、図5-6に示すようにPEG系樹脂付きエントリーシートで500穴加工し、その直後にアルミニウム製エントリーシートを用いて100穴加工し、その後、再度PEG系樹脂付きエントリーシートを用いて100穴加工を行う順序とした。その際の穴壁面粗さは、図5-6に示す赤丸箇所の穴で測定した。穴壁面のコンター図を図5-7(a)に、粗さを図5-7(b)に示す。図5-7より、樹脂部の穴壁面のくぼみはアルミニウム製エントリーシートの加工に移って5つめの505穴目付近から顕著に現われ、それ以降はくぼんだ状態が継続している。そしてPEG系樹脂付きエントリーシートの加工に移った直後の601穴目で、穴壁面粗さが急激に改善している。このことから、ドリル付着物は4穴加工程度まではPEG系樹脂の付着効果が持続すると考えられる。

5.3.6 wax系樹脂付きエントリーシートの穴壁面粗さの改善

5.3.1項で述べたように、穴壁面粗さに関してwax系樹脂付きエントリーシートはPEG系樹脂付きエントリーシートに劣ることがわかった。その要因は、PEG系樹脂の融点が低く、ドリルにまとわりつきやすい特性のためと考えられる。そこで、wax系樹脂付きエントリーシート樹脂部の低融点化を行い、穴壁面粗さの改善を試みた。

5.3.6.1 穴壁面粗さに及ぼす低融点樹脂添加量の影響

PEG系樹脂の融点と同程度のwax系低融点塗料（以下、吸熱剤とする）

を wax 系樹脂に 10%, 30%及び 50%添加した樹脂付きエントリートを試作した。その 3 種類の樹脂の熱特性を図 5-8 に示す。図 5-8 より、吸熱剤添加量の増加とともに 60℃付近の吸熱量が大きくなっている。また、全体の吸熱も添加量の増加とともに増えていることがわかる。

図 5-9 は、吸熱剤を添加した樹脂付きエントリーシートを使って実験条件②で穴加工し、穴壁面粗さを調べた結果を示す。図 5-9 より、吸熱剤の添加量が 10%と 30%の樹脂付きエントリーシートでは大きな違いは見られないが、添加量が 50%では穴壁面粗さが改善されていることがわかる。ただし、穴壁面粗さのバラつきは大きい。

5.3.6.2 穴壁面粗さに及ぼす樹脂巻付き性の影響

吸熱剤を添加した樹脂付きエントリーシートを用いて穴加工を行い、その様子を高速度カメラで観察した。その結果、樹脂がドリルにまとわりつ

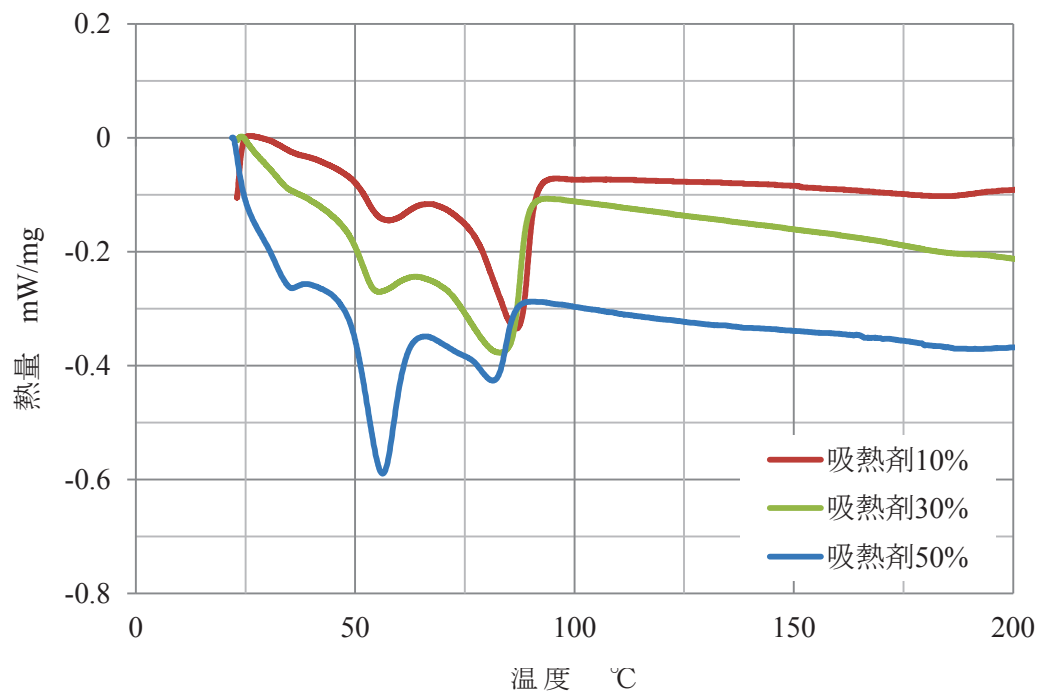


図 5-8 熱特性に及ぼす吸熱剤添加量の影響

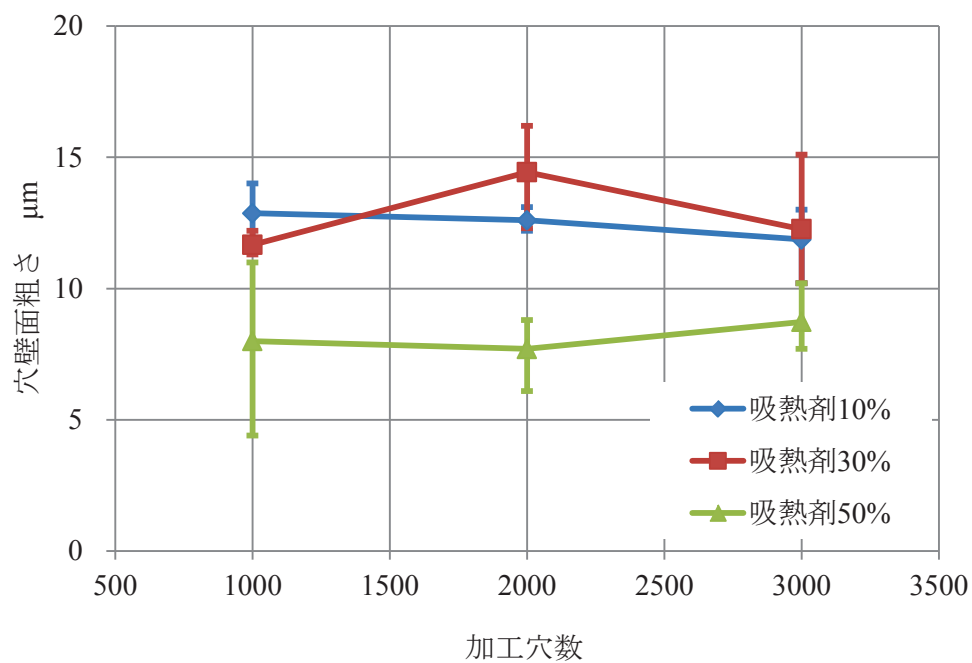


図 5-9 穴壁面粗さに及ぼす吸熱剤添加量の影響

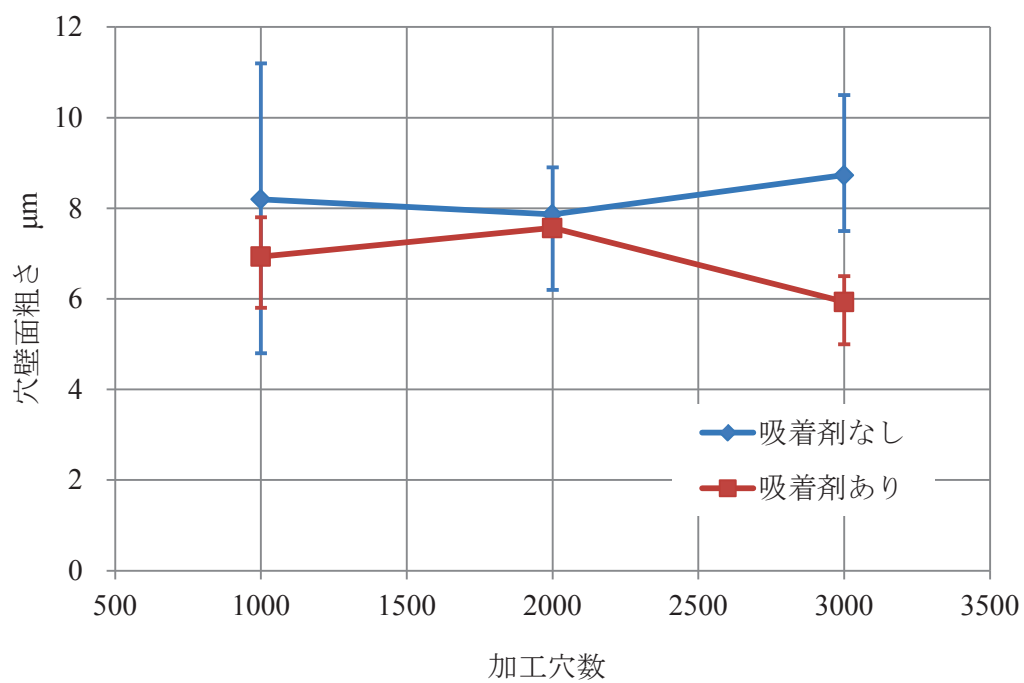


図 5-10 穴壁面粗さに及ぼす吸着剤の影響

きにくく、飛散しやすいことがわかった。そこで、5.3.6.1 項の吸熱剤添加量 50%のエントリーシートに、ドリルにまとわりつきやすい高分子系の樹脂を添加した樹脂付きエントリーシート（以下、吸着剤ありと呼ぶ）を試作した。図 5-10 は、吸着剤ありと吸熱剤添加量 50%（以下、吸着剤なし）を使って実験条件②で穴加工し、穴壁面粗さを調べた結果を示す。図 5-10 より、吸着剤の添加により穴壁面粗さの平均値は 1~2 μm 程度改善されている。さらに、吸着剤の添加によりバラつきが約 7 μm から 2 μm と小さくなった。高速度カメラでエントリーシート樹脂部加工中の切りくず排出を観察すると、吸着剤ありの樹脂はドリルに巻き付きやすく、吸着剤なしの樹脂はドリルに巻き付きにくいことが確認できた。

5.4 結言

本章では、穴壁面粗さに及ぼす樹脂付きエントリーシート樹脂特性の影響を、PEG 系樹脂付きエントリーシート、wax 系樹脂付きエントリーシートおよびアルミニウム製エントリーシートを用いた穴加工実験を行って調べた。得られた結果を以下に示す。

- （１）PEG 系樹脂や wax 系樹脂を塗布したエントリーシートを用いるとアルミニウム製エントリーシートに比較して穴壁面粗さが改善される。
- （２）穴壁面粗さは、wax 系樹脂付きエントリーシートよりも PEG 系樹脂付きエントリーシートを用いるほうが良好である。
- （３）PEG 系樹脂付きエントリーシートは、融点が低く、樹脂に巻き付きやすいため、切削温度が低下し、穴壁面粗さが良好になる。

- (4) wax 系樹脂に融点の低い樹脂を添加することで，穴壁面粗さが改善される．
- (5) ドリルに巻き付きやすい高分子系の樹脂を wax 系樹脂に添加することで，樹脂がドリルに巻き付きやすくなり，その結果，穴壁面粗さのばらつきが小さくなる．

第6章 回転振れのある小径ドリルの加工挙動

6.1 緒言

第1章で述べたように、直径1mm以下の小径ドリル加工ではドリルの偏心などに起因する回転振れの影響が無視できなくなっている。特に、小径ロングドリルによる微細深穴加工では、加工精度に及ぼす回転振れの影響が大きい。小径ドリル加工における回転振れの発生は、加工精度の悪化や工具折損につながるため、振れを抑えるホルダや主軸が開発されるとともに、回転振れを測定・管理する装置も開発されてきた。

そのような中、近年渡邊らの研究⁶⁻¹⁾⁶⁻²⁾では、図 6-1に示すように回転振れのあるドリルが食い付き時から徐々に回転中心に収束して行く現象、いわゆる求心現象を高速度カメラで2次元的に観察している。また、著者らは第4章で述べたように、樹脂付きエントリーシートの食い付き時におけるドリル先端の挙動を非接触変位センサで計測し、ドリル先端の求心性

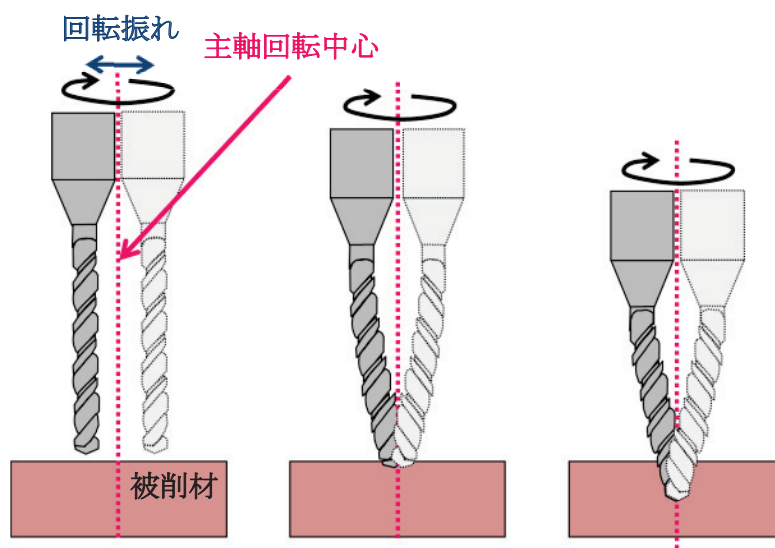


図 6-1 求心現象

に及ぼす被削材材料の影響について考察している．さらに，梶田らの研究⁶⁻³⁾では，ドリル先端を円錐状の丸棒に置き換えて求心現象について数式モデルを提案し，実験により求心現象の検証を行っている．この研究では，回転振れのあるドリルが被削面に食い付いた際，ドリル先端は被削材から横方向の抵抗を受けて，ドリル根元（シャンク端面）に対して位相遅れが発生すると述べられている．位相遅れの発生は，ドリルの弾性変形を意味しており，その結果としてドリルには弾性回復力が発生し，これらの力の関係によりドリル先端が求心するとしている．梶田らの研究⁶⁻³⁾は，回転振れのあるドリルの求心現象について説明されている先駆的な研究である．しかし，求心時にドリル先端に作用する力の向きや大きさ，あるいはドリル先端形状を考慮した求心現象の解明には至っていない．

そこで本章では，有限要素法を利用した切削シミュレーションソフトウェア（Advantedge：開発元 Third wave systems）を用いて，回転振れのあるドリルの被削面食い付き時の切削力とドリル先端移動軌跡を数値計算し，ドリル求心性に及ぼす次の 6 項目の影響を解析により調べた．

- ① 食い付き時の切れ刃の向きの影響
- ② 被削材材料の影響
- ③ 送り量の影響
- ④ ドリル中心軸の傾きの影響
- ⑤ ドリル先端角の影響
- ⑥ ドリル剛性の影響

さらに，①と②に関しては加工実験を行うことで解析方法の妥当性を検証した．

6.2 求心現象

回転振れのあるドリルが被削材上面で空転する場合，図 6-2 に示すように主軸回転中心からみた切れ刃の向きは常に同じである．これは，仮に剛

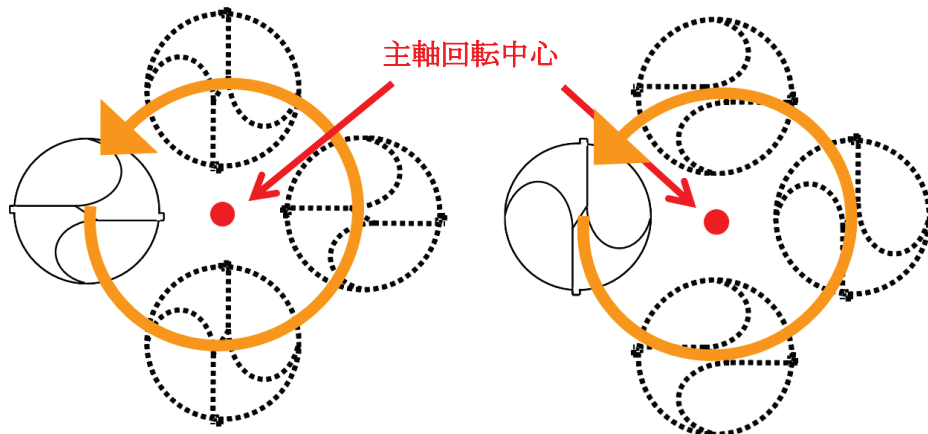
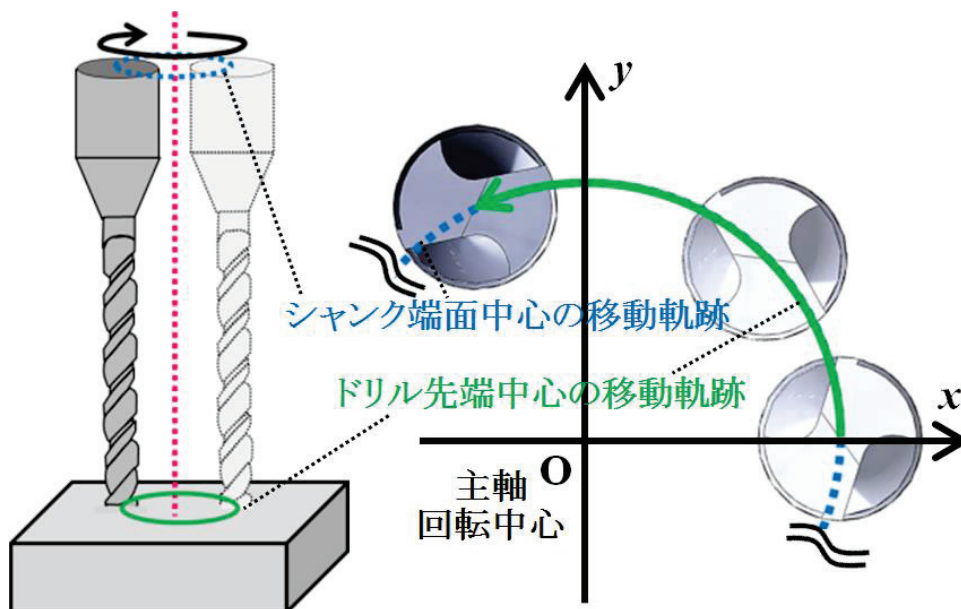


図 6-2 回転振れのあるドリル先端移動軌跡と切れ刃の向きの関係



(a) 3 次元的にみた図

(b) ドリル先端からみた図

図 6-3 剛体ドリルの加工挙動

体のドリルで加工したとすると、そのようになる．剛体ドリルの場合，図 6-3(a)に示すようにドリルは弾性変形せず，ドリル先端中心とシャンク端面中心は同じ軌跡を描く．ドリル先端方向からみた場合，図 6-3(b)に示すように主軸回転中心からみた切れ刃の向きは常に同じである．しかし，実際のドリルは剛体ではなく変形するため，ドリル先端中心はシャンク端面中心と同じ軌跡を描かず，図 6-4(a) に示すようにドリル先端が主軸回転中心に収束する場合がある．なお，図 6-4(b)はドリル先端からみた求心途中のある瞬間を表しており，緑色実線上の点 A がドリル先端中心，青色破線上の点 B がシャンク端面中心，点 O が主軸回転中心を表している．

回転振れのあるドリルが被削材に接触した瞬間，ドリル先端と被削材の間でx-y面内に力が働く．その結果，図 6-4(b)に示すようにドリルが弾性変形するため、シャンク側とドリル先端で回転方向に $\angle BOA$ だけ位相遅れが発生する．この場合，ドリル先端にはx-y面内において，回転中心から

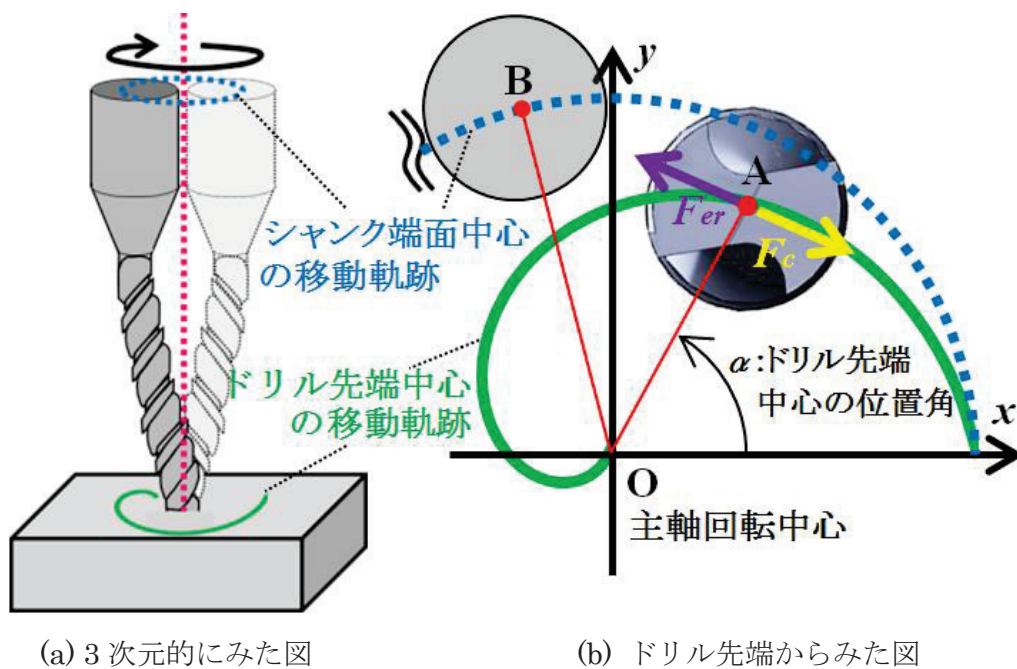


図 6-4 求心する場合の加工挙動

半径方向に働く工具の遠心力や被削材との間に発生する摩擦力を含んだ x - y 面内切削力 F_c が働いており、ドリルにたわみが生じている。また、たわみをシャンク中心にもどそうとする弾性回復力 F_{er} が F_c と釣り合っている。

仮にドリルの先端が円錐の丸棒と考えた場合、ドリル先端は x - y 面内において被削材から力を受けながら求心する⁶⁻³⁾。この際、ドリル先端とシャンク端面で位相遅れが生じるが、円錐の先端はどのような向きに対しても同じ形状であるため、力の向きは常にシャンク端面中心を向いている。しかし、ドリルの先端が実際の切れ刃の場合、ドリル先端形状の影響により力の向きが変化するため、移動軌跡が異なると考えられる。切れ刃の向きに着目すると、図 6-4(b)に示すように本来は点 B での切れ刃の向きが、位相遅れにより点 A で生じていることになる。このように、切れ刃の向きは位相遅れにより時々刻々変化することから、ドリル先端の移動軌跡に及ぼす影響については、6.4 節で考察する。

6.3 解析方法および実験方法

6.3.1 解析方法

切削加工は力学的な視点からみると、被削材の弾塑性変形後、破壊により切りくずが生成される現象である。熱力学的な視点からみると、材料の変形や工具・被削材間の摩擦による発熱現象である⁶⁻⁴⁾。そこで本研究では、ひずみ速度依存性と大変形を考慮した弾塑性解析、ならびに切削熱や摩擦熱による材料軟化特性を考慮した熱伝導解析を同時に行うことができる切削シミュレーションソフトウェア⁶⁻⁵⁾を用いて、回転振れが発生し

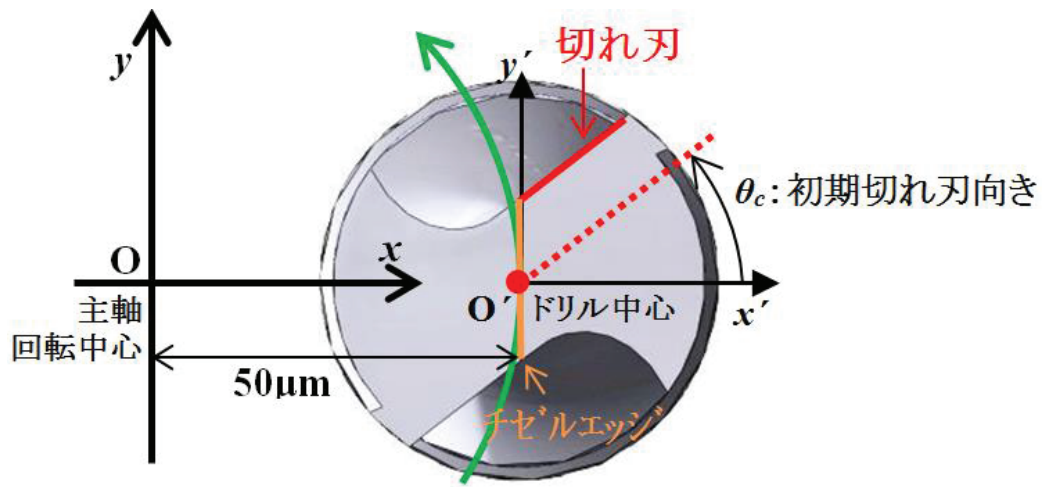


図 6-5 ドリルの解析モデル ($t=0$)

たドリルで加工するときの切削力と、それによるドリルの曲げ変形およびねじり変形を計算し、ドリル先端のチゼルエッジ中心点の移動軌跡（以下、ドリル先端移動軌跡と呼ぶ）を求めた。

6.3.1.1 解析モデルおよび解析条件

図 6-5 に、使用した解析モデルの主軸回転中心とドリルの位置関係を示す。なお、この図は解析開始時 ($t=0$) の解析モデルを表している。図中、 x - y は主軸回転中心にある座標系で、 x' - y' はドリルに固定されてドリルとともに回転する座標系である。解析では、図に示すようにドリルの中心を主軸回転中心から x 軸方向に $50\mu\text{m}$ (TIR: Total Indicator Run-out 表示では振れ量 $100\mu\text{m}$) 離れた点にしている。また、ドリルに固定された x' 軸と切れ刃のなす角（以下、初期切れ刃向きと呼ぶ）を θ_c とし、図 6-6 に示す $\theta_c=0^\circ$, 45° , 90° および 135° の 4 種類について解析を行った。

解析に使用したドリルを図 6-7 に示す。渡邊らの研究⁶⁻¹⁾で報告されているように、求心現象はドリル剛性により変化する。本研究では、求心性

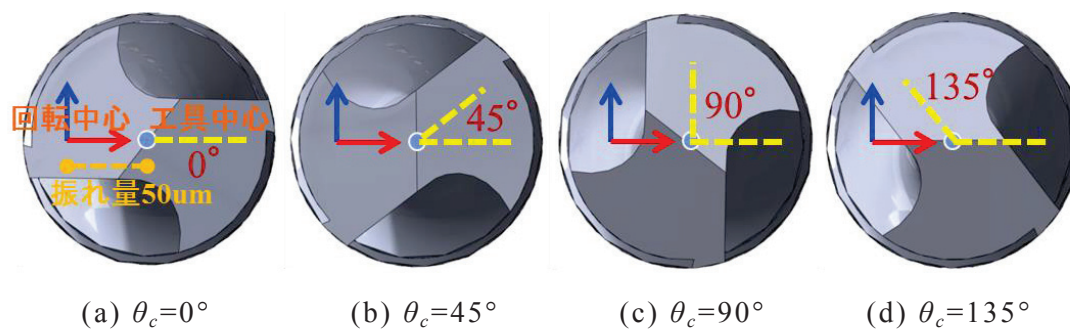


図 6-6 解析を行った 4 種類の初期切れ刃向き

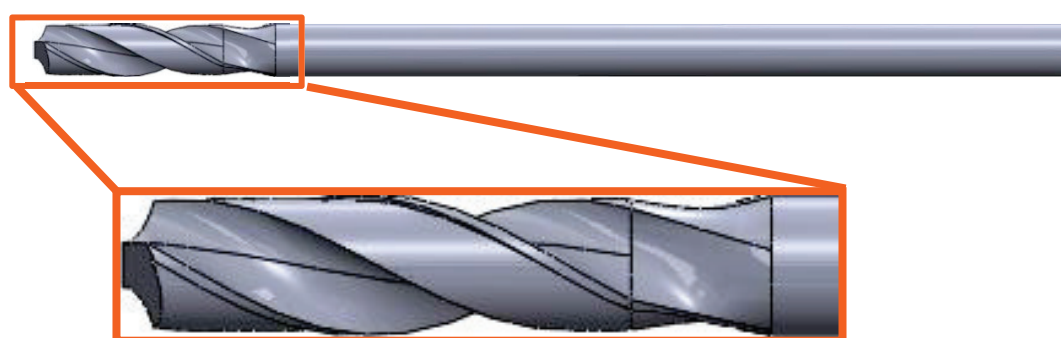


図 6-7 解析に用いたドリル

表 6-1 ドリルの諸元

長さ	溝長 0.7mm, 全長 3mm
形状	先端角 120°, 芯厚 0.05mm, 逃げ角 12°, ねじれ角 30°
直径	φ0.15
材料	超硬

に及ぼす初期切れ刃向きの影響について検討するが，切れ刃の向きによりドリル剛性が変化しない範囲で検討を行うこととする．解析に用いたドリルのフルート部からシャンク円筒面までの形状とシャンク部の長さが半径方向のドリル剛性に影響を及ぼすものと考えられる．そこで，ドリルは切れ刃の向きによる半径方向の剛性値の違いが 1% 以内になる形状とした．そのドリルの諸元を表 6-1 に示す．

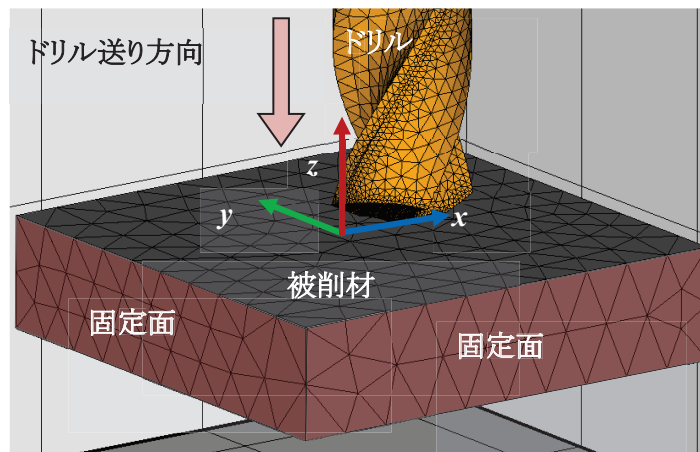


図 6-8 工具と被削材の境界条件

ドリルと被削材の解析モデルを図 6-8 に示す．ドリル先端の移動軌跡は，加工中のドリル先端中心の座標値を図中の x および y 座標系にプロットしたリサージュ図形で表した．また，被削材の境界条件は，ソフトウェアの設定上，側面のみ完全固定であり，他の面は自由面である． z 方向の板厚に関しては，仮に， x および y 方向の長さに対して z 方向の板厚が極端に薄い場合，被削材全体の弾性変形による解析結果への影響が懸念される．一方，板厚が厚くなると解析時間の増大につながる．

そこで，解析結果に及ぼす板厚方向の剛性（ x および y の長さを同じにし，それらの長さに対する z の比率）の影響をドリル先端の移動軌跡を求めることにより調べた．異なる板厚における移動軌跡の結果を図 6-9 に示す．図 6-9 より，比較を行った 3 モデルにおいて，被削材サイズがドリル先端の移動軌跡に大きな影響を及ぼさなかったため，解析時間の最も短い $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.12\text{mm}$ を解析モデルとした．

本研究では，プリント配線板のドリル食い付き時の穴の位置精度向上を目的としている．そのため，表 6-2 に示すように被削材をエントリーシーの材料である純アルミニウムとし，切削条件を一般的なプリント配線板

の穴加工条件とした。

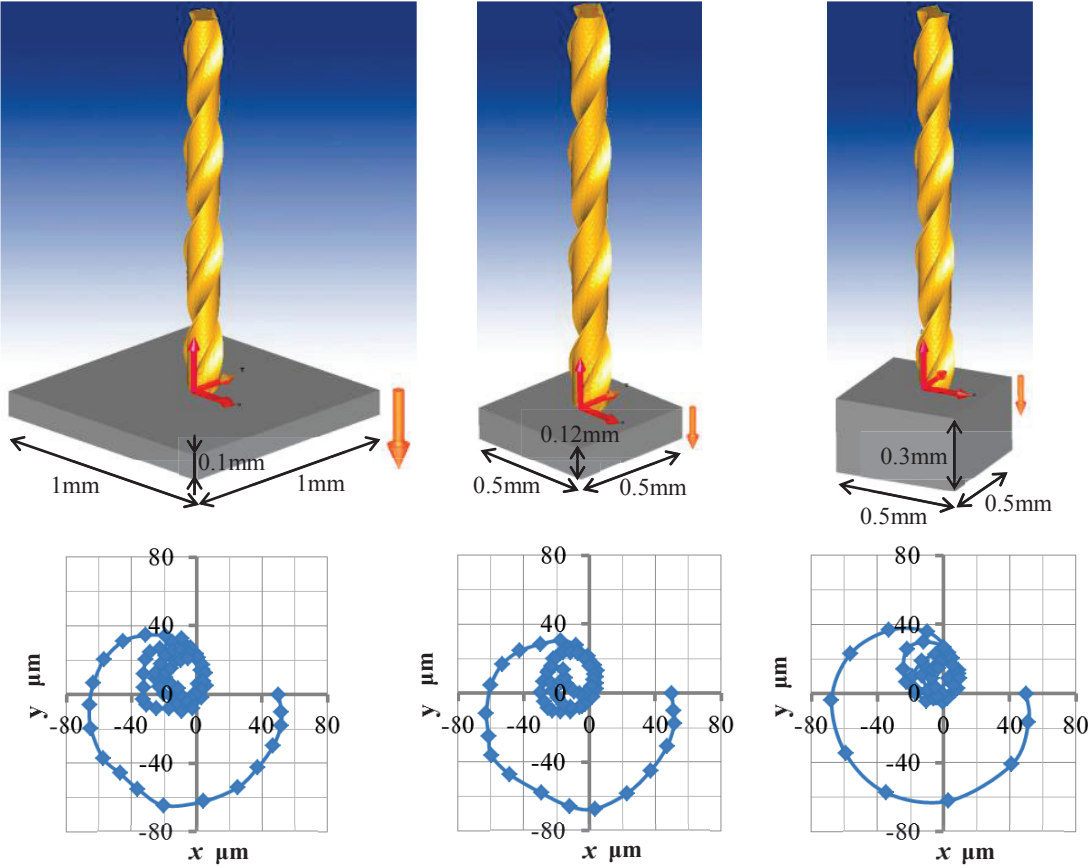


図 6-9 被削材サイズとドリル先端の移動軌跡の関係

表 6-2 切削条件

被削材	純アルミニウム(A1100), SUS304
寸法	$x\ 0.5\text{mm}, y\ 0.5\text{mm}, z\ 0.12\text{mm}$
主軸回転速度	$300,000\text{min}^{-1}$
送り量	$3\sim30\mu\text{m/rev}$
主軸回転角度	540°

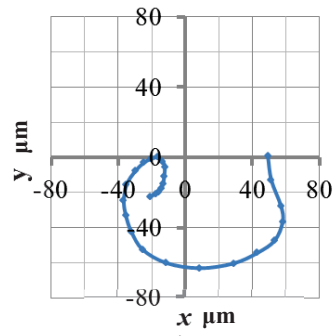
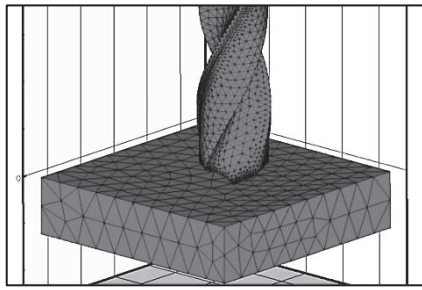
6.3.1.2 メッシュサイズについて

ドリル先端移動軌跡の解析には、メッシュサイズを細かくすることで 1 条件の解析で 2 週間以上要する場合がある。そのため、解析結果に及ぼす影響の小さい箇所はメッシュを粗くし、解析結果に及ぼす影響の大きい箇所はメッシュを細かくすることで、解析精度向上と解析時間短縮を図ることができる。そこで、ドリルと被削材が接触するドリル逃げ面と被削材加工点近傍のメッシュサイズを細かくし、それ以外のメッシュサイズを粗くした。なお、ドリル逃げ面のメッシュサイズは工具径の 2% (3 μ m) とし、被削材の加工点近傍のメッシュサイズは工具径の 3% (5 μ m) とした。また、被削材は切りくず生成によりリメッシュされるため、アダプティブ法⁶⁻⁶⁾により初期メッシュサイズを維持した。

ここで、ドリル逃げ面と被削材の加工点近傍以外のメッシュサイズを粗くすることで、解析結果の精度低下が懸念される。そこで、表 6-3 に示す異なるメッシュサイズの 4 モデルで解析を行い、移動軌跡に及ぼすメッシュサイズの影響を調べた。メッシュサイズと移動軌跡の関係を図 6-10 に示す。なお、メッシュサイズは被削材とドリルを粗くしたモデル、被削材のみ細かくしたモデル、ドリルのみ細かくしたモデル、被削材とドリルを細かくしたモデルとした。図 6-10 より、比較した 4 モデルにおいて、ド

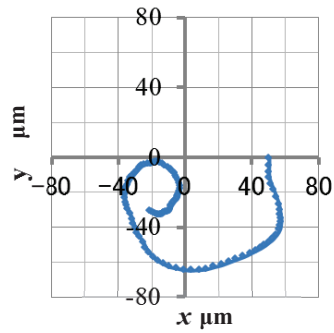
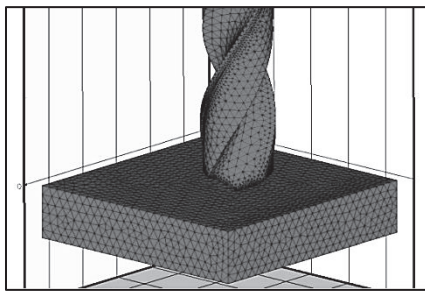
表 6-3 メッシュサイズの影響を検証したモデルの節点間距離

	ドリル先端	加工点近傍	ドリル全体	被削材全体
モデル 1	3 μ m	5 μ m	25 μ m	50 μ m
モデル 2				25 μ m
モデル 3			10 μ m	50 μ m
モデル 4				25 μ m



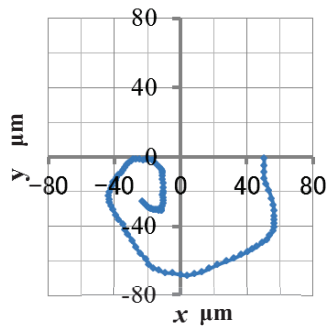
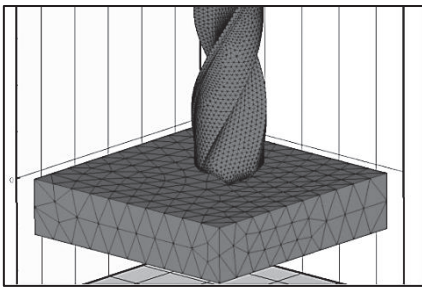
ドリルの節点数：10647
被削材の節点数：543

(a) モデル 1



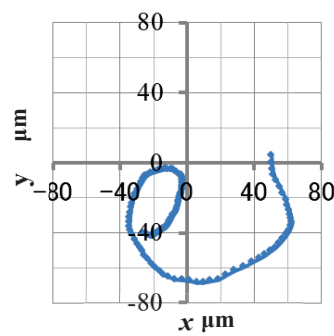
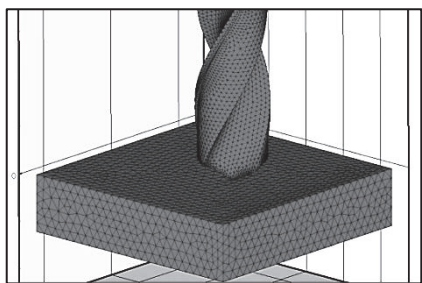
ドリルの節点数：10746
被削材の節点数：4014

(b) モデル 2



ドリルの節点数：49321
被削材の節点数：545

(c) モデル 3



ドリルの節点数：49359
被削材の節点数：4071

(d) モデル 4

図 6-10 ドリル先端の移動軌跡に及ぼすメッシュサイズの影響

ドリル先端の移動軌跡に大きな影響がなかったため、解析時間の短いモデル 1（メッシュサイズはドリルで約 25 μm ，被削材で約 50 μm ）で数値計算を行った。

6.3.2 実験方法

ドリル先端の移動軌跡の測定は，4.2.3 項で述べた方法と同じである。

実験に使用したドリルは，第 4 章の図 4-2，表 4-1 で示したドリルと同じである．なお，実験での初期切れ刃向き θ_c の設定方法は，以下のとおりである．図 6-11 に示すように，まずドリルの切れ刃を x' 軸に対して角 θ_c だけ回転させた状態でセットし，次に x' 軸に垂直な面内でドリルシャンク部円筒面を所定の量だけ平面研削する．研削した面を 4 つにスリ割されたコレットの 1 つの面に合わせてチャッキングすることで，初期切れ刃向き θ_c が設定されると同時に，主軸回転中心に対してドリル中心が図 6-5 の x 軸方向に所定の量だけオフセットされる。

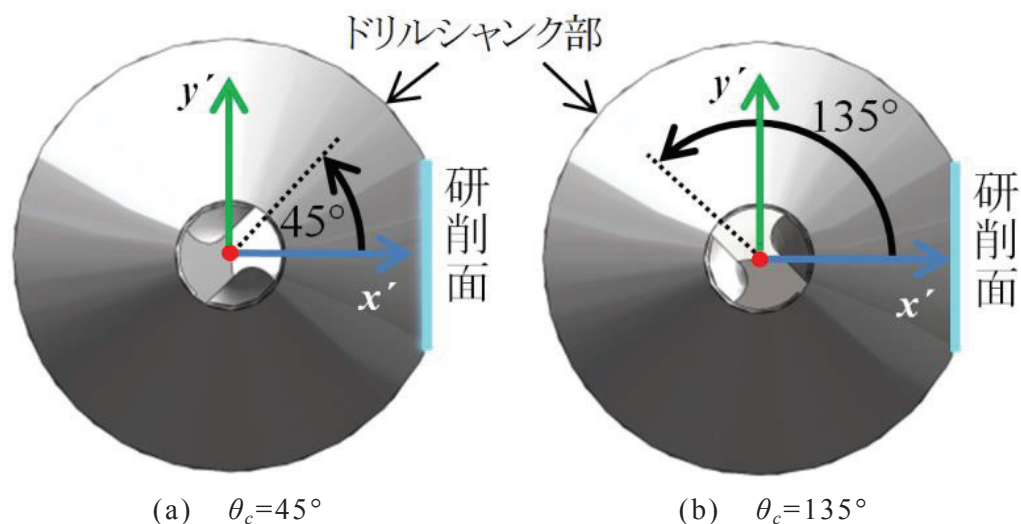


図 6-11 初期切れ刃向き θ_c の設定方法

6.4 解析結果および実験結果

6.4.1 ドリル先端移動軌跡および切削力に及ぼす初期切れ向きの影響

初期切れ刃向き θ_c が 0° , 45° , 90° および 135° の 4 種類のドリルで A1100 を加工するときの切削力とドリル先端移動軌跡を数値計算で求めた. 各 θ_c における移動軌跡の結果を図 6-12(a)~(d) に示す. なお, 図中の $x=0, y=0$ の位置が主軸回転中心である. 角 α は図 6-4(b)に示す x 軸と OA のなす角で, 本論文ではドリル先端中心の位置角と呼ぶ.

位相遅れがない場合, 図 6-3 に示したようにシャンク端面中心の回転角度とドリル先端中心の位置角は同じである. しかし, 位相遅れがある場合はそうではなく, 例えば図 6-12(a)をみるとドリル先端中心の位置角 α が約 80° に対して, シャンク端面中心の回転角度 (図中の●印の色) は約 135° であり, 両者の角度が異なっていることがわかる. これは他の θ_c においても同様である. また, 各 θ_c における移動軌跡を比較すると, θ_c が 45° , 90° , 0° , 135° の順で求心しやすい. この点については 6.5 節で考察する.

また, ドリル先端の求心とともに, 切削力の x および y 成分の変動量が小さくなっているが, これは求心とともにドリルの弾性変形が小さくなり, 弾性回復力が小さくなっていることを表している. 一方, ドリル先端が回転中心に収束する回転角度と切削力の z 成分が一定値に近づく回転角度は, ほぼ同じである. これは, ドリル先端が求心するにつれて回転振れの少ない通常のドリル加工が行われるため, z 成分が一定の値に近づくものと考えられる.

解析方法の妥当性を検証するため, 2 つの θ_c に対して実験を行った. なお, 実験は 6.3.2 項で述べたように, 一般的なプリント配線板の実験条件でドリル先端の移動軌跡を測定できないため, 測定可能な実験条件で行った.

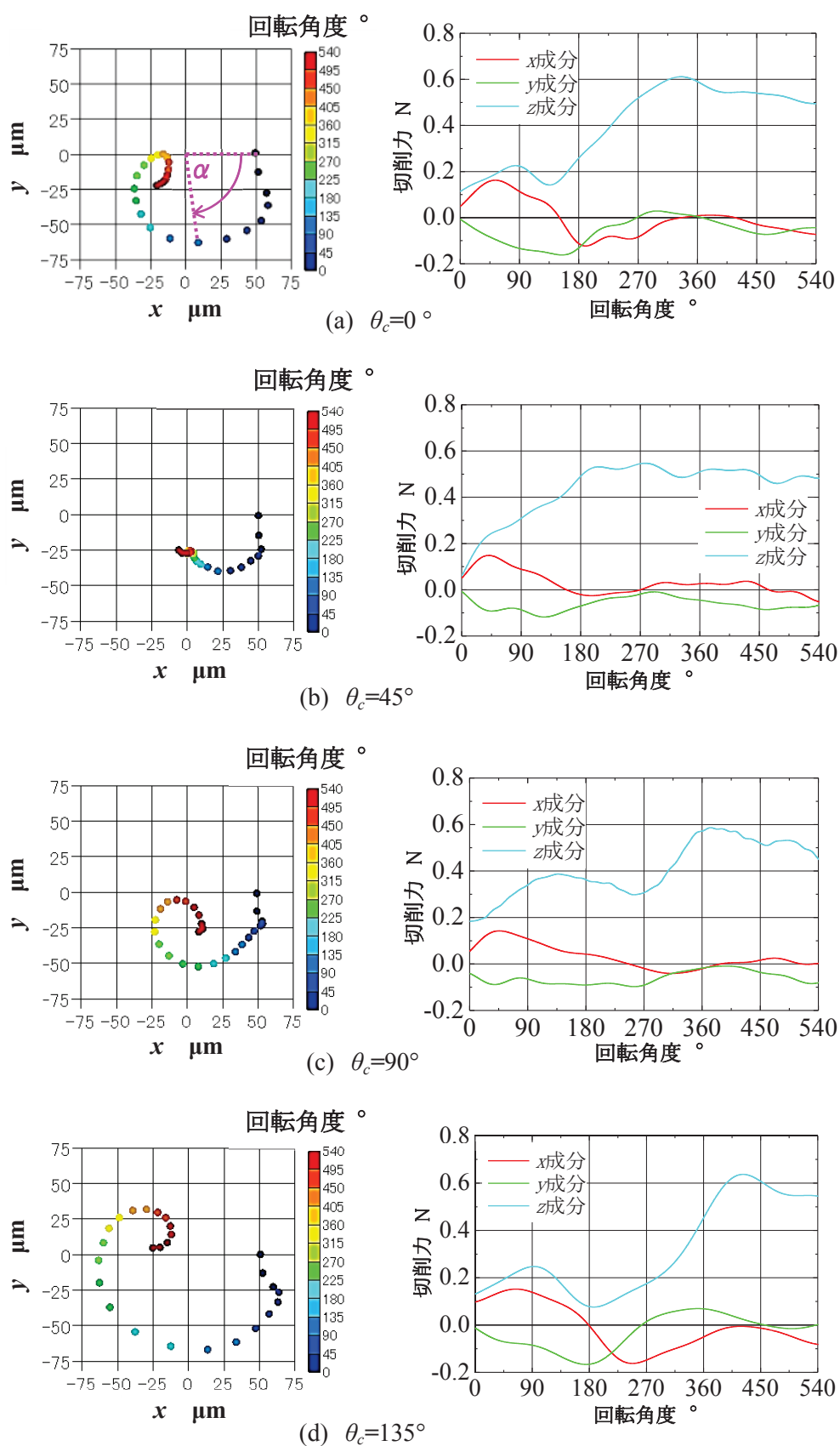


図 6-12 各初期切れ刃向きにおける切削力とドリル先端の移動軌跡(A1100)

回転振れが約 $3\mu\text{m}$ (TIR 表示では約 $6\mu\text{m}$) の $\phi 0.15$ 小径ドリルを用いて主軸回転速度 $20,700\text{min}^{-1}$, 送り量 $7.5\mu\text{m/rev}$ で A1100 を加工し, 移動軌跡を測定した. $\theta_c=45^\circ$ の結果を図 6-13(a) に, $\theta_c=135^\circ$ の結果を図 6-13 (b) に示す. なお, ドリルの被削面への接触点を明確にするため, 切削抵抗センサ (日本キスラー(株):9317B) を被削材と z 軸昇降型自動ステージ間にセットし, スラストが発生し始めた点を測定してドリル先端接触点とした. 図中, 青色の部分が被削材上空を空転しているときの移動軌跡であり, 赤色の部分が加工しているときの移動軌跡である.

図 6-13 は, 解析結果である図 6-12 と同様, $\theta_c=135^\circ$ より $\theta_c=45^\circ$ のほうが求心しやすいことがわかる. なお, この結果は 5 回の繰り返し試験において, すべて同様の結果であった.

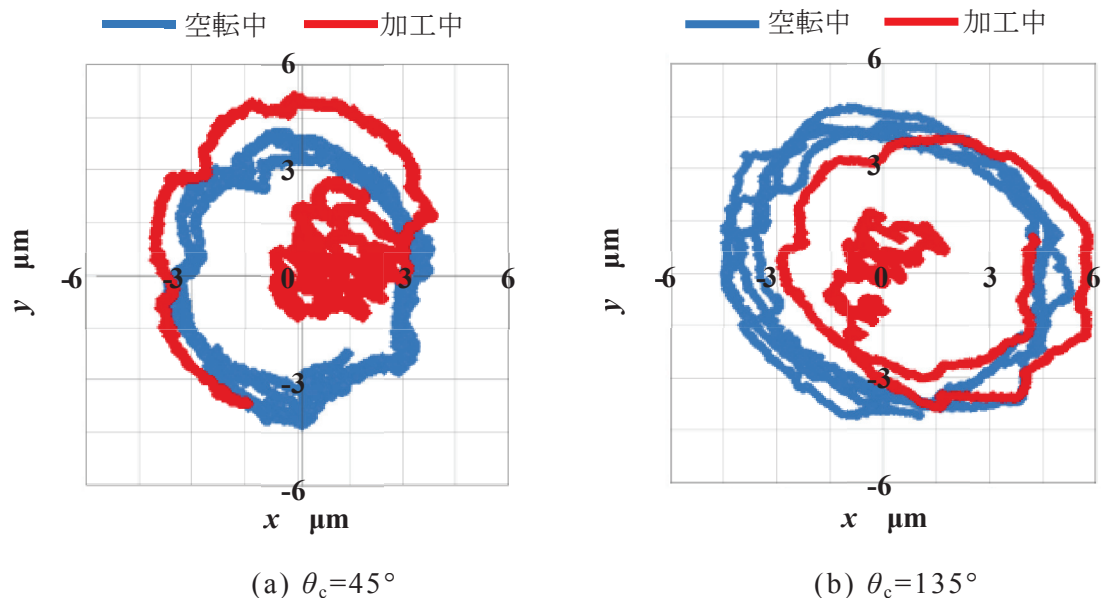


図 6-13 各初期切れ刃向きにおけるドリル先端の移動軌跡 (実験結果)

6.4.2 ドリル先端移動軌跡および切削力に及ぼす被削材材料の影響

図 6-12 と同じ条件で SUS304 を加工するときのドリル先端移動軌跡と切削力の数値計算結果を図 6-14 に示す．図 6-14 より明らかなように，ドリル先端の移動軌跡は，被削材が A1100 から SUS304 になったことすべての θ_c において求心しにくい結果となった．これは，比切削抵抗の増大により，被削材から受ける x および y 成分の抵抗が大きくなり，ドリルが被削面に食い付いた後，振れ回ろうとしても，求心する前に位置決めされるためと考えられる．また，求心性に及ぼす θ_c の影響は，A1100 加工時に比べて小さいことがわかる．

SUS304 加工時の切削力の x および y 成分は A1100 加工時と比べて大きな差はないが， z 成分は 3 倍程度となっている．図 6-5 で説明したように， x - y 面内では弾性回復力と切削力が常に釣り合っており， x および y 成分の切削力は工具剛性に依存する．しかし， z 方向には，強制的な送り運動が与えられるため，比切削抵抗増大の影響が顕著に出たものと考えられる．

次に，回転振れ約が $18\mu\text{m}$ （TIR 表示では約 $36\mu\text{m}$ ）のドリルで被削材 A1100 と SUS304 を主軸回転速度 $20,700\text{min}^{-1}$ ，送り量 $7.5\mu\text{m/rev}$ で加工し，移動軌跡を測定した．図 6-15(a)に A1100 の結果を，図 6-15(b)に SUS304 の結果を示す．図 6-15 より，被削材が A1100 の場合，ほぼ主軸回転中心に位置決めされているのに対し，SUS304 の場合は主軸回転中心から少し外れた箇所で位置決めされていることがわかる．このような被削材材料により求心性が異なる現象は，解析結果（図 6-12 および図 6-14）と同様である．

6.4.1 と 6.4.2 の結果から解析モデルが妥当であることが確認できた．そこで，この後の検証は解析のみで行う．

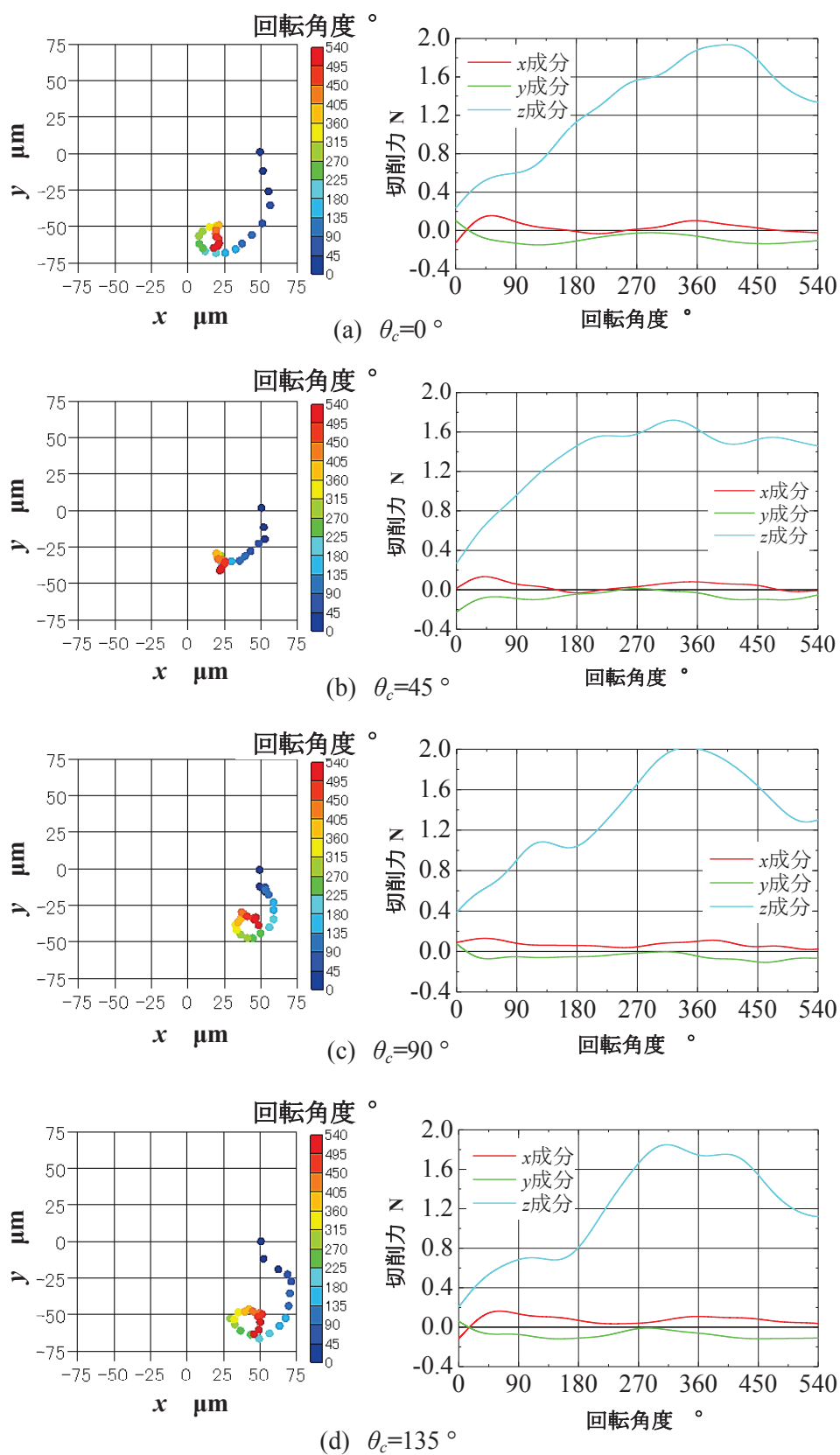


図 6-14 各初期切れ刃向きにおける切削力とドリル先端の移動軌跡(SUS304)

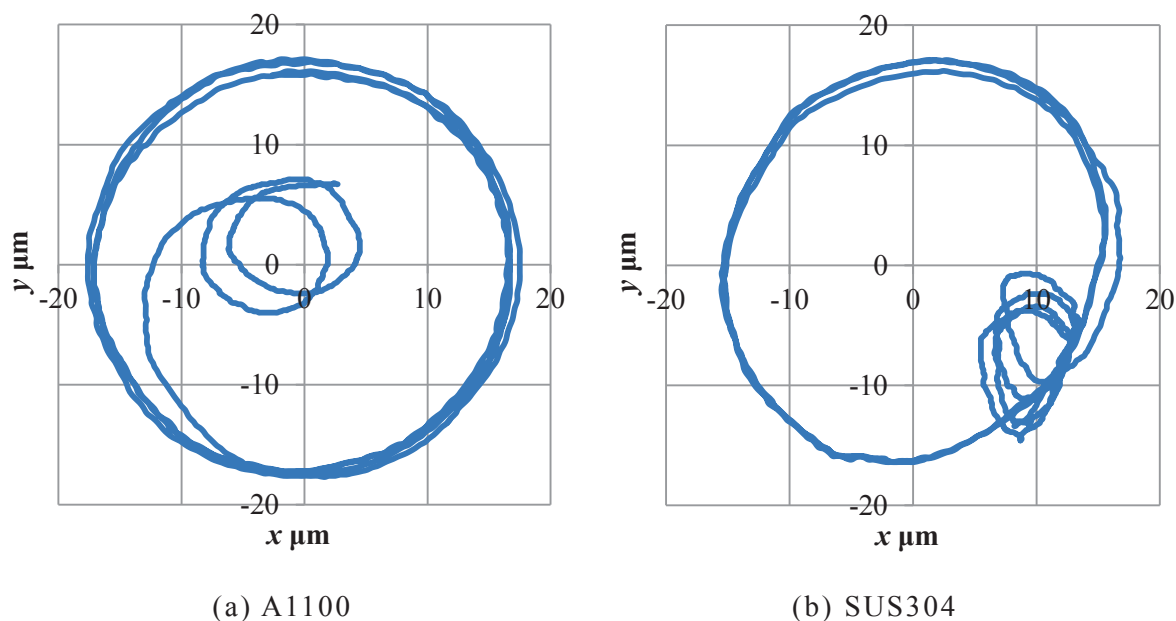
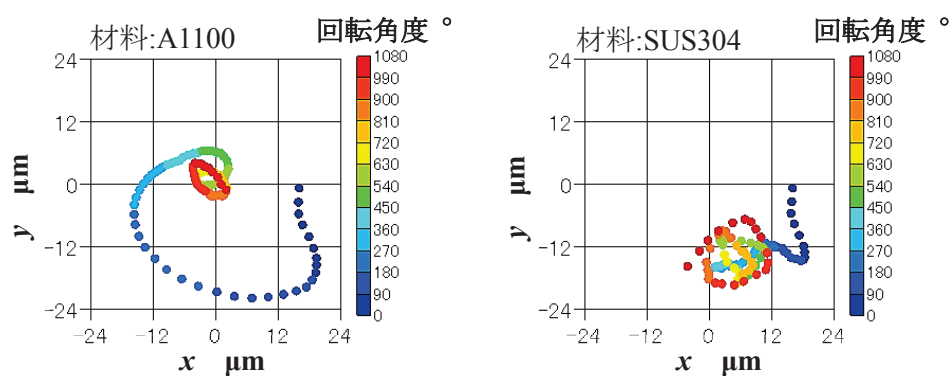


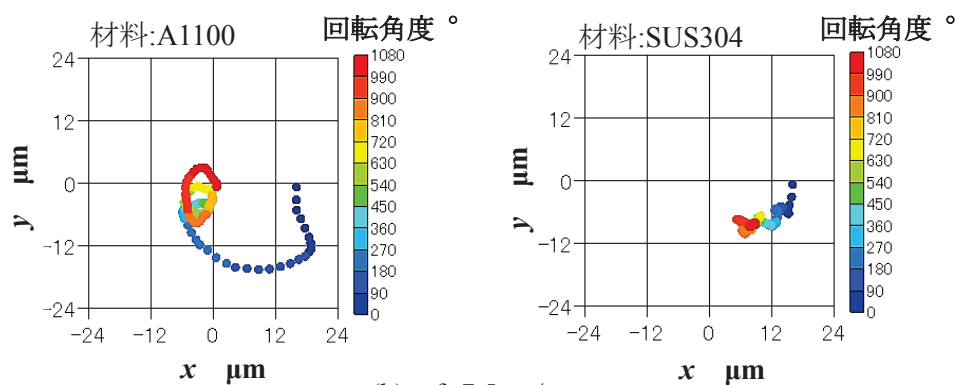
図 6-15 各被削材材料におけるドリル先端の移動軌跡（実験結果）

6.4.3 求心性に及ぼす送り量の影響

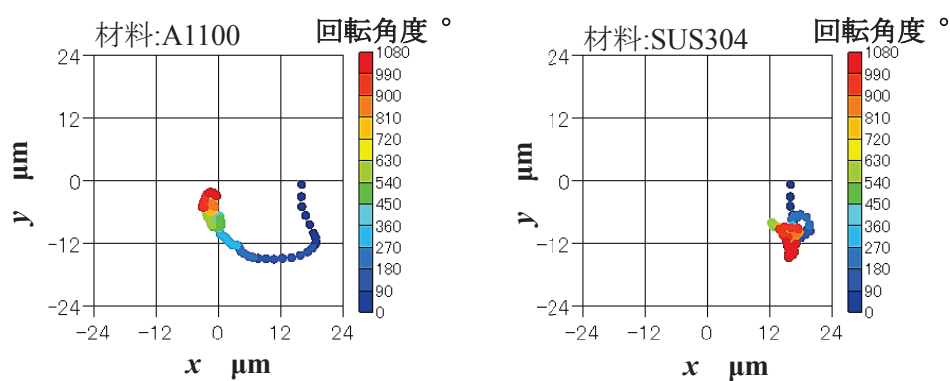
送り量を $3\mu\text{m/rev}$, $7.5\mu\text{m/rev}$, $15\mu\text{m/rev}$ および $30\mu\text{m/rev}$ とし，被削材が A1100, SUS304 の場合におけるドリル先端移動軌跡を数値計算した．なお，実験条件は，解析方法の妥当性を実験で検証できるように，実験可能な主軸回転速度 $20,700\text{min}^{-1}$ ，回転振れ $18\mu\text{m}$ で数値計算を行った．各送り量における移動軌跡を図 6-16 に示す．図 6-16 より，送り量の増加にともない，ドリル先端は振れ回りにくくなり，より少ない回転角度で位置決めされていることがわかる．また，6.4.2 項と同様にどの送り量においても A1100 より SUS304 のほうが求心しにくい結果となった．A1100 では，送り量 $30\mu\text{m/rev}$ 以外であればほぼ求心しており，その中でも早期に求心しやすいのは送り量 $15\mu\text{m/rev}$ であることがわかる．一方，SUS304 の場合はそれとは異なり，送り量 $7.5\mu\text{m/rev}$ が最も求心しやすく，それ以外は求心していない．送り量の増加は，少ない回転角度で z 方向に加工が進行す



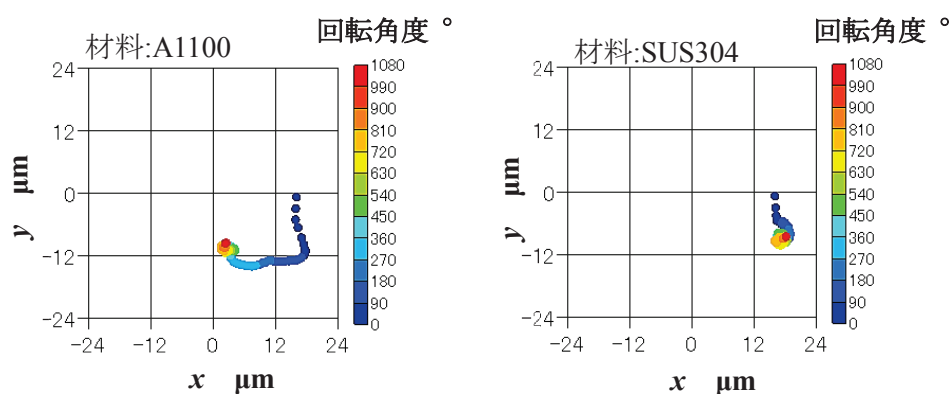
(a) $f=3\mu\text{m/rev}$



(b) $f=7.5\mu\text{m/rev}$



(c) $f=15\mu\text{m/rev}$



(d) $f=30\mu\text{m/rev}$

図 6-16 各送り量と被削材材料におけるドリル先端の移動軌跡

ることを意味している。また、穴深さが深くなることでドリルの側面が被削材より受ける接触面積の増大につながる。そのため、ドリル先端は x - y 面内において被削材より受ける力が大きくなり、結果として求心性が悪くなったものと考えられる。

6.4.4 求心性に及ぼすドリル中心軸の傾きの影響

ドリル中心軸が主軸回転中心軸に対して傾いている場合、求心性への影響が懸念される。そこで、ドリル中心軸を主軸回転中心軸に対して傾けた場合の移動軌跡を調べた。なお、図 6-17 に示すようにドリル先端が主軸方向に傾いている場合を傾き角プラスとし、逆方向を傾き角マイナスとし、その傾き角を以下 γ とする。

ドリルの傾き角 γ を $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 3^\circ$ および $\pm 5^\circ$ とした場合のドリル先端移動軌跡を数値計算した。ただし、 θ_c は 135° である。ドリル中心軸が＋側に傾いている場合の移動軌跡を図 6-18(a) に、－側に傾いている場合の移動軌跡を図 6-18(b) に示す。図 6-18 より、ドリル中心軸が－側よりも＋側のほう

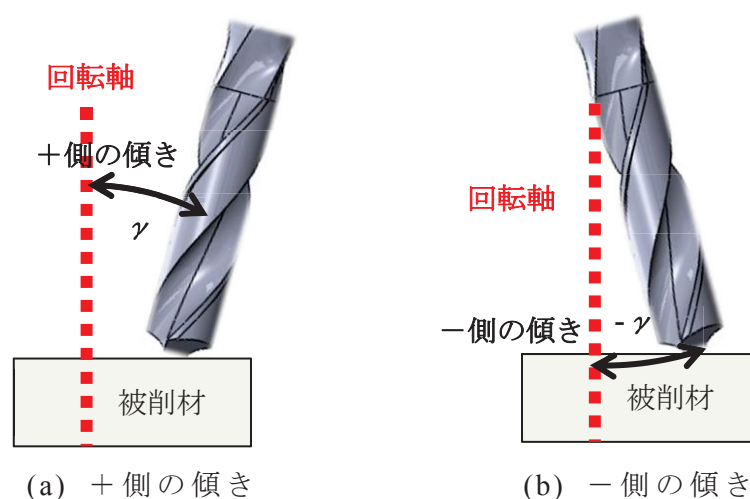


図 6-17 ドリル中心軸の傾き

が求心しやすいことがわかる．また，＋側に傾いている場合は傾き角の影響をあまり受けないが，－側に傾いている場合は傾き角の影響が大きいこともわかる．

次に，初期切れ刃向き θ_c を変えた場合のドリル中心軸傾き方向の影響

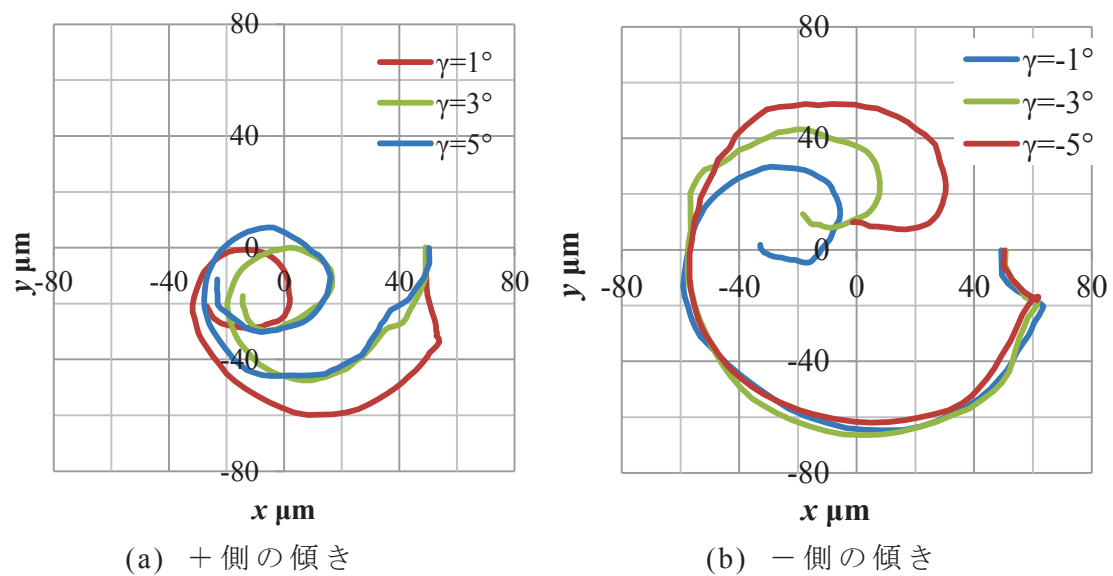


図 6-18 ドリル中心軸の傾き角を変えた場合のドリル先端移動軌跡

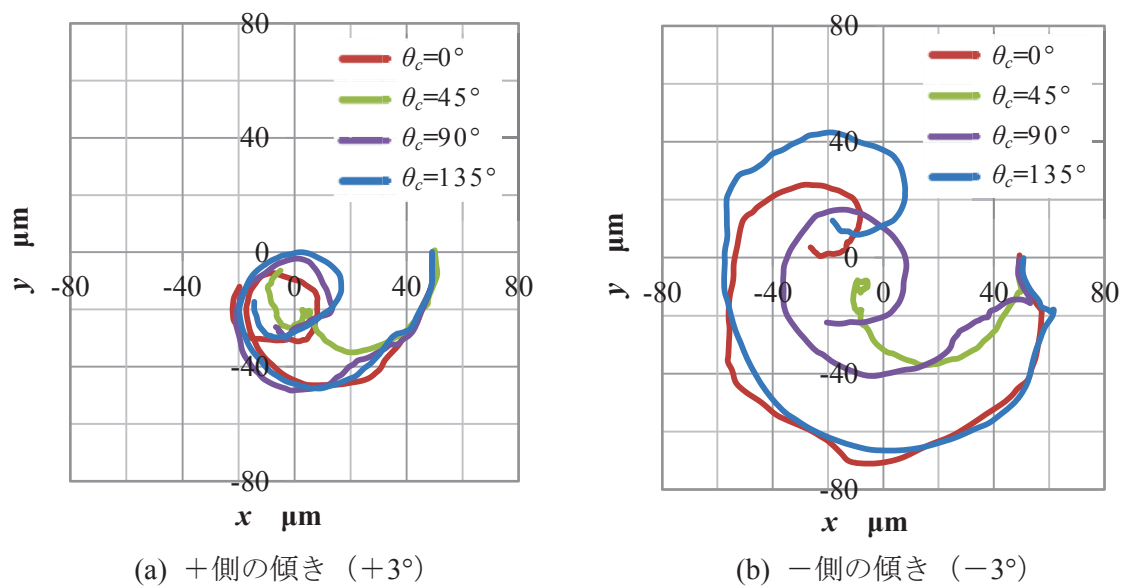


図 6-19 ドリル中心軸が傾いた状態で初期切れ刃向き変えた場合のドリル先端移動軌跡

を調べた．ドリル中心軸が $+3^\circ$ 傾いている場合の各 θ_c における移動軌跡を図 6-19(a)に， -3° 傾いている場合のそれを図 6-19(b)に示す．図 6-19 より，求心性に及ぼす影響は， $\theta_c=135^\circ$ ， 0° ， 90° ， 45° の順で大きく，すべて $+$ 側に傾いたほうが求心しやすい． $+$ 側に傾いたほうが求心しやすい理由は，ドリル先端が主軸方向に傾いた場合，ドリルの z 軸方向の送り運動により被削材から受ける反力の主軸中心方向成分が発生して求心しやすくなり，その逆に傾いた場合，反力の方向が逆になるため求心しにくいと考えられる．

6.4.5 求心性に及ぼすドリル先端角の影響

求心性に及ぼすドリル先端角の影響を調べた．なお，ドリルは図 6-20(a)に示したドリルモデルを逃げ面とチゼルエッジに対して直角な断面でカット(図 6-20(b))し，その平面内におけるドリル先端の角度(図 6-20(c))を θ とし， $\theta=90^\circ$ ， 100° ， 120° ， 140° および 150° の5種類とした．求心性に及ぼすドリル先端角の影響を図 6-21 に示す．図 6-21 より， $\theta_c=45^\circ$ では求心性にドリル先端角がさほど影響を及ぼさないが， $\theta_c=135^\circ$ では求心性

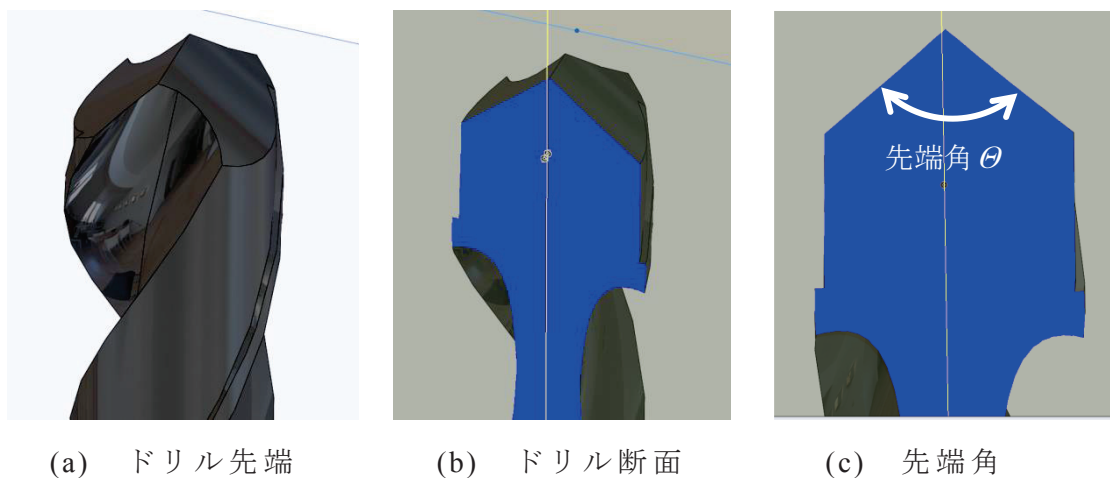


図 6-20 ドリルの先端角

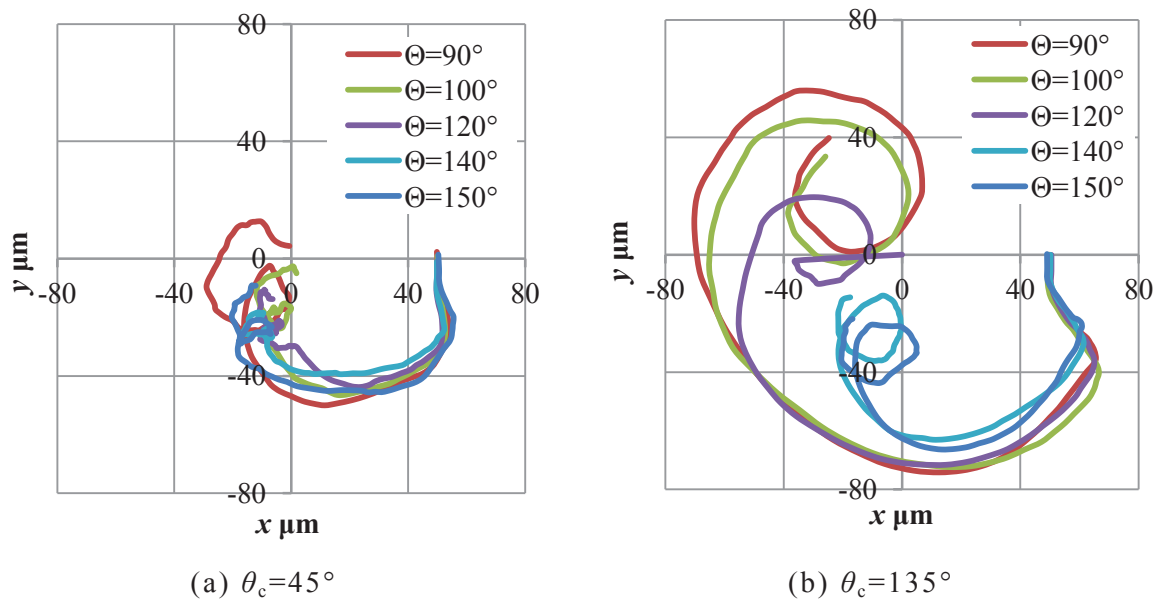


図 6-21 求心性に及ぼすドリル先端角の影響

にドリル先端角が大きく影響していることがわかる．図 6-12 の結果と合わせて考察すると，求心しやすい θ_c のドリルであればドリル先端角の影響はあまり受けないが，求心しにくい θ_c のドリルであれば，それらの影響を大きく受けることとなる．このように求心性が異なるのは，ドリル先端形状により被削材から受ける力が異なるためである．すなわち，先端角が鋭角になると逃げ面が被削材から x - y 面内の力の影響を受けやすく，先端角が鈍角になると影響を受けにくくなるためと考えられる．詳細については，6.5 節で考察する．

6.4.6 求心性に及ぼすドリル剛性の影響

上述の数値計算の結果から，初期切れ刃向き，被削材材料，送り量，ドリル中心軸の傾き，先端角の影響により被削材から受ける力が変化し，その結果，ドリル先端の移動軌跡に影響が出たものと考えられる．求心性に及ぼすドリル剛性の影響を調べた．図 6-22 に結果を示す．なお，ドリル

剛性は、図中に示すように切れ刃長さを一定にし，シャンク円筒面の長さを変えることで変化させた．図 6-22 より，最も求心しやすいドリルは全長 3.5mm（ドリル剛性 $0.89\text{mN}/\mu\text{m}$ ）であり，次に全長 2.5mm（ドリル剛性 $2.03\text{mN}/\mu\text{m}$ ），そして全長 5mm（ドリル剛性 $0.33\text{mN}/\mu\text{m}$ ）の順であった．この結果から，求心性にはドリル剛性も影響することがわかる．

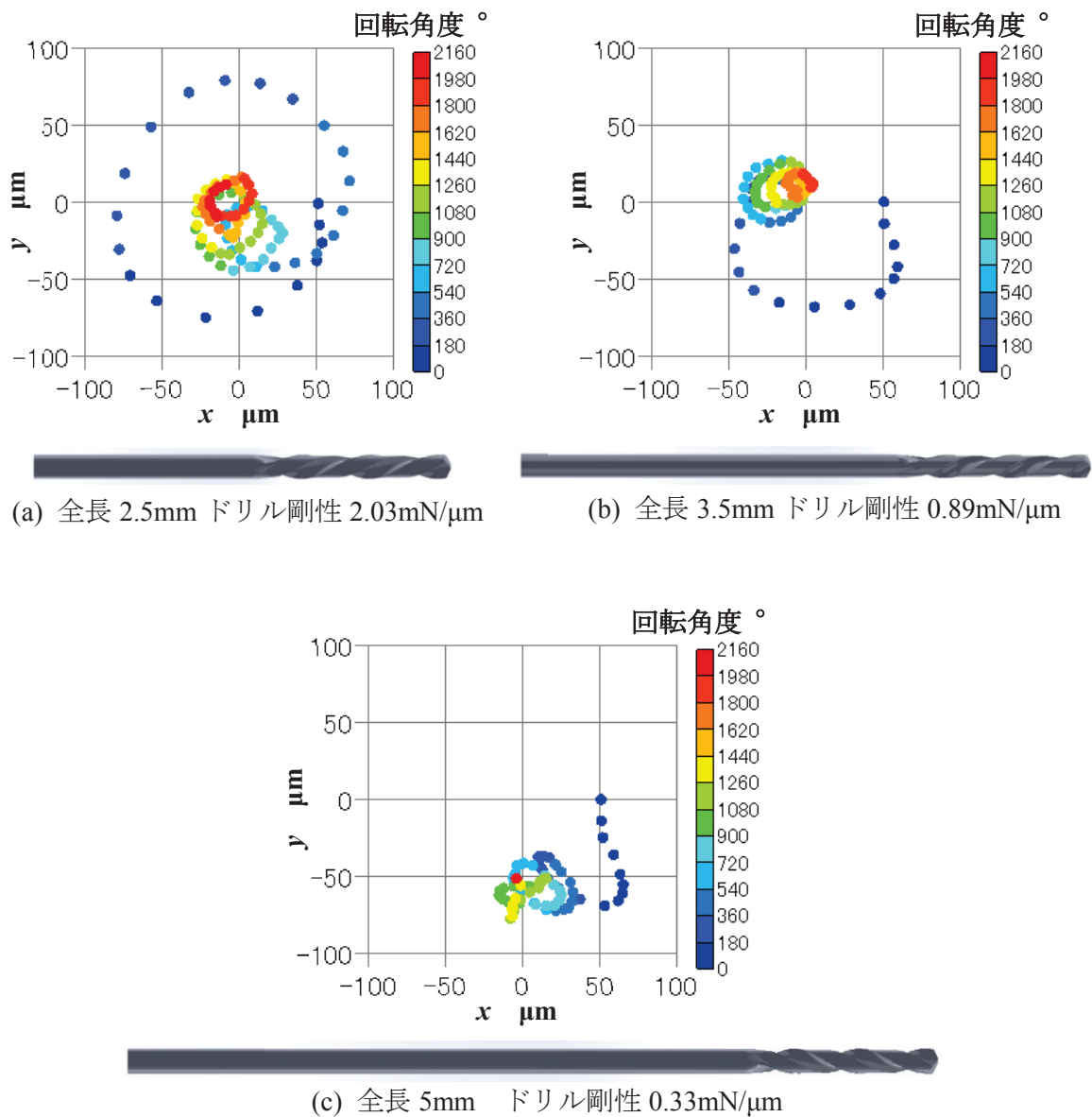


図 6-22 ドリル剛性を変えた場合のドリル先端の移動軌跡

6.5 求心性に関する考察

6.5.1 求心性に及ぼす工具先端形状の影響

図 6-4に示したように，ドリル先端は切削力と弾性回復力が釣り合いながら求心すると考えられ，ドリルに対して切削力は外力として，弾性回復力は内力として作用している．被削面食い付き時に対するある瞬間のポテンシャルエネルギー変化を考えると，ドリルの弾性変形に起因するひずみによるエネルギー変化 U_{er} （内部ポテンシャルエネルギー変化）は， x - y 面内でのドリル先端中心とシャンク端面中心との距離の変化量 δ_1 の関数である．一方，切削力によるポテンシャルエネルギー変化 U_c （外部ポテンシャルエネルギー変化）は， x - y 面内でのドリル先端の移動距離 δ_2 の関数である．ここで，系全体の全ポテンシャルエネルギー変化 Π は，

$$\Pi = U_{er}(\delta_1) + U_c(\delta_2) \quad (1)$$

で表され⁶⁻⁷⁾⁶⁻⁸⁾，図 6-23に示すように δ_1 と δ_2 により変化する．このような系では， Π が最小のとき，すなわち $\delta_1 = \delta_1^*$ ， $\delta_2 = \delta_2^*$ のときが釣り合い状態

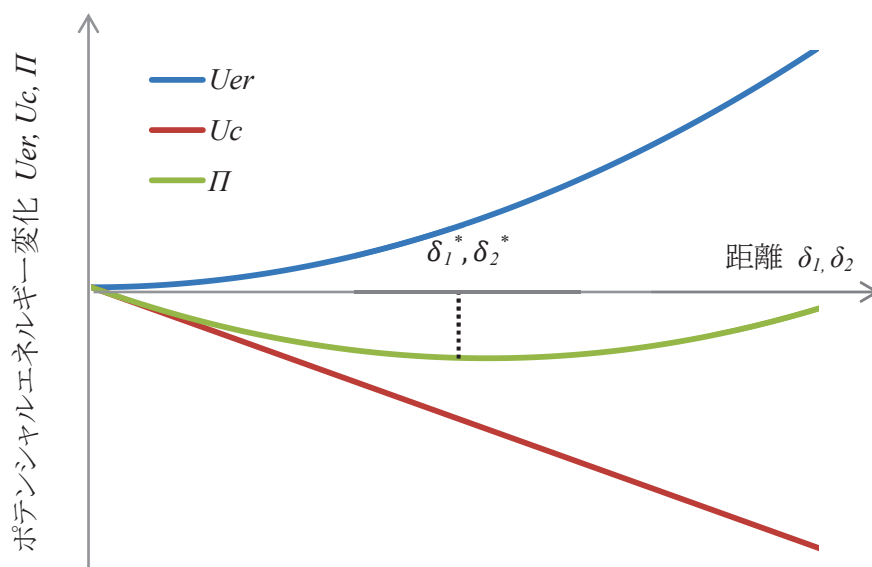


図 6-23 ドリル加工中のポテンシャルエネルギー変化と移動距離の関係

であるとした，最小ポテンシャルエネルギー原理⁶⁻⁷⁾⁶⁻⁸⁾からドリル先端の移動方向と移動距離が決まる．

図 6-24は，微小時間 Δt の間に移動するドリルの移動軌跡を示している．ここで，点Aと点Bは，ドリル先端中心とシャンク端面中心を表している．これらの2つの点は，時刻 $t + \Delta t$ ではそれぞれ点A'，点B'に移動する．

なお，釣り合い状態となる δ_1^* と δ_2^* をベクトルで表すと次式で表される．

$$\overrightarrow{\delta_1^*} = \overrightarrow{A'B'} - \overrightarrow{AB} \quad (2)$$

$$\overrightarrow{\delta_2^*} = \overrightarrow{AA'} \quad (3)$$

U_{er} を決定する弾性回復力変化の向きは $\overrightarrow{\delta_1^*}$ の向きそのものであるが， U_c を決定する切削力の向きは $\overrightarrow{\delta_2^*}$ の向きではなく，ドリル先端形状により変化する．

ここで，図 6-25に示すタイプA，タイプB，タイプCおよびタイプDの4つの工具に対して，被削材を固定して工具を切り込んだ状態で黄色い矢印

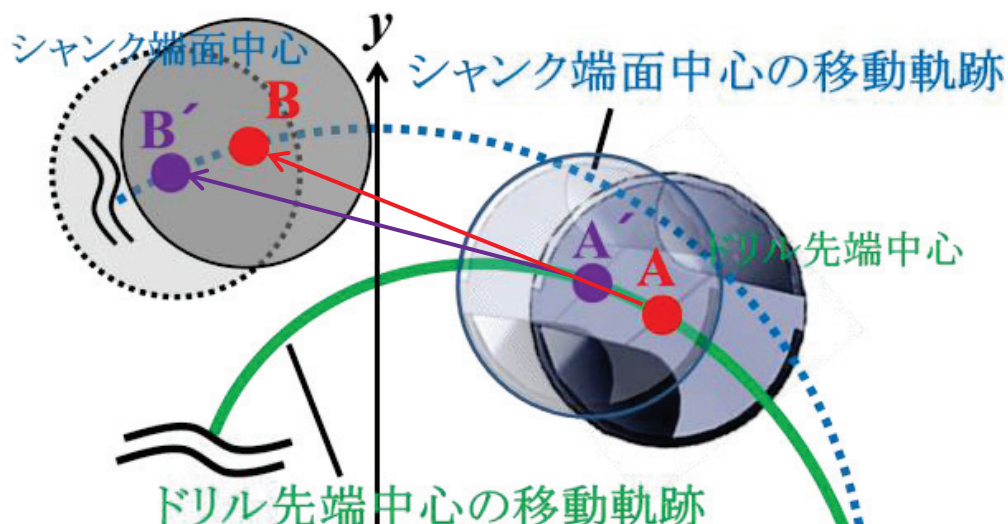


図 6-24 微小時間変化したときのドリルの状態

の方向に移動させる場合を考える．工具先端が方向性のない円錐形状をしている場合（図 6-25(a)：タイプ A），どのような方向に移動しても同じ力を受ける．

しかし，工具先端が通常のドリル形状の場合，チゼルエッジに対して直角方向に横移動させるタイプ B（図 6-25(b)）では，チゼルエッジと同じ方向に移動させるタイプ C（図 6-25(c)）に比べて被削材から受ける力が大きいことは容易に想像がつく．また，タイプ D（図 6-25(d)）のようにチゼルエッジが傾いている場合，ドリルを図の右側に移動させようとする力の成分が生じる．このように，横移動時にドリル先端が被削材から受ける力はチゼルエッジの向きによって異なり，これが求心性に影響を及ぼすものと考えられる．このようなドリル先端が受ける力を「移動抵抗」と定義し，次節以降で検討する．

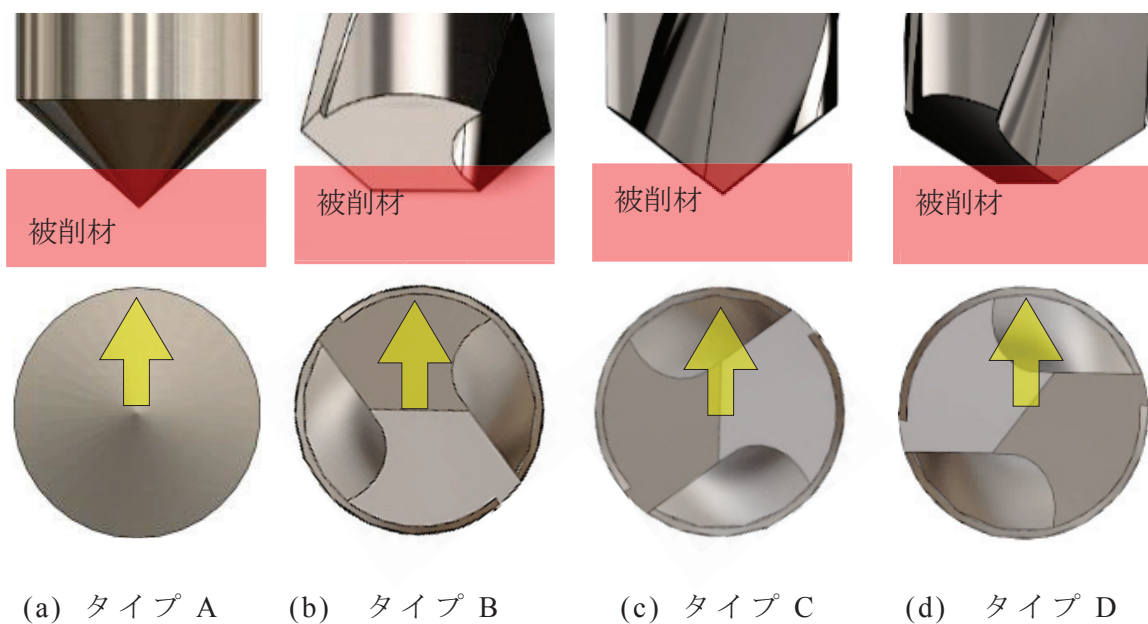


図 6-25 工具先端形状と移動方向

6.5.2 移動抵抗の主軸回転中心方向成分と求心性の関係

6.3.1.1 項で述べた解析モデルでは、切れ刃の向きが位相遅れにより時々刻々変化するため、一定の切れ刃の向きで移動抵抗を算出できない。そこで、図 6-3 で示した剛体ドリルを用いて解析を行い、得られた切削力を移動抵抗とした。解析に用いたドリルは点対称形状であるため、初期切れ刃向き θ_c は $0 \sim 150^\circ$ まで 30° 間隔で 6 種類とした。その他の境界条件などは、6.3.1 項と同じである。なお、初期切れ刃向き θ_c と区別するため、主軸回転中心から見た加工中の切れ刃の向きを θ として解析を行った。 θ の角度のとり方は図 6-5 の θ_c と同じであり、剛体ドリルの場合は $\theta = \theta_c$ で、加工中変化しない。加工中の切れ刃の向きと主軸回転中心方向の移動抵抗を図 6-26 に示す。なお、主軸回転中心方向の移動抵抗の正負は、主軸回転中心方向を正、逆方向を負とし、移動抵抗は穴深さ $30\mu\text{m}$ までを $-z$ 方向に $5\mu\text{m}$

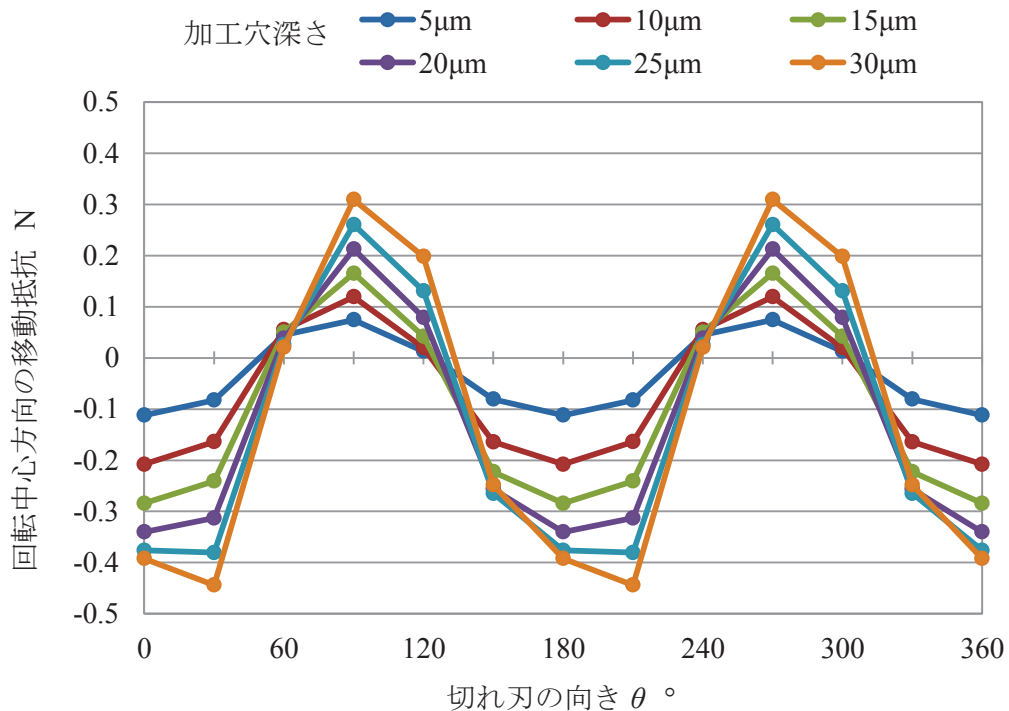


図 6-26 移動抵抗に及ぼす切れ刃の向きの影響

間隔で 6 種類算出した。

図 6-26 から，移動抵抗は θ が $60 \sim 120^\circ$, $240 \sim 300^\circ$ で主軸回転中心方向に働き， $330 \sim 30^\circ$, $150 \sim 210^\circ$ で主軸回転中心方向と逆向きに働いている．また，穴深さの増加により，移動抵抗が増加している．これは，ドリルが横移動する際にドリル側面部と被削材の接触面積が増大することで移動抵抗が増大したものと考えられる．

図 6-12 に示した数値計算の結果では，加工直後から位相遅れにより切れ刃の向きが時々刻々変化している．そこで，図 6-12 から各穴深さにおける θ を求め，図 6-27 に示す．なお， θ の初期値は，それぞれ $\theta_c=0^\circ$, 45° , 90° および 135° である．

図 6-27 より， $\theta_c=45^\circ$ では， θ は主軸回転中心方向に力が発生する $60 \sim 120^\circ$ を向いているのに対し，それ以外の θ_c では，必ずしも $60 \sim 120^\circ$ 方向

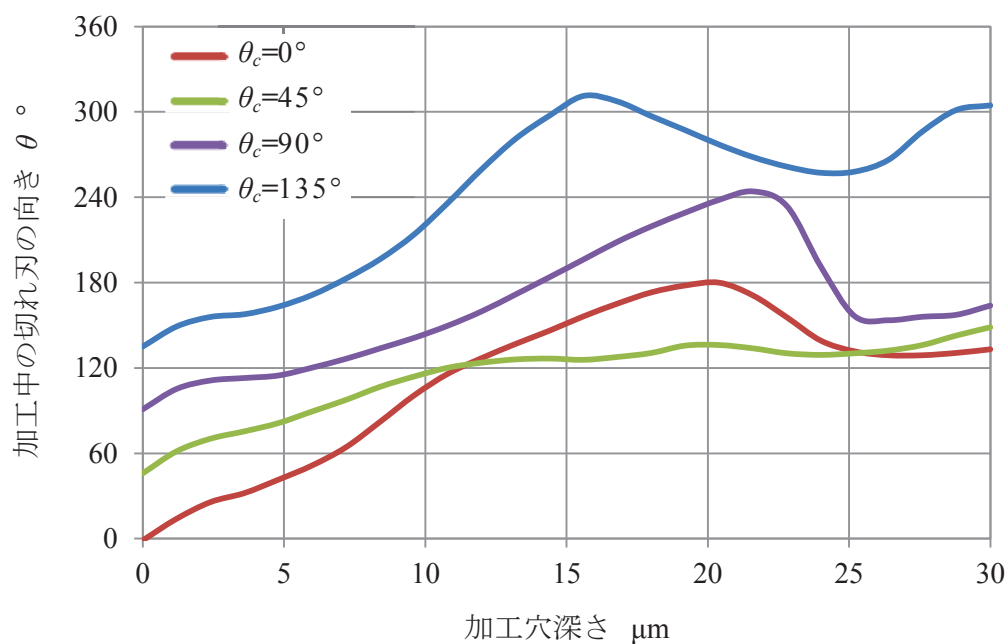


図 6-27 加工穴深さと加工中の切れ刃の向きの関係

を向いていないことがわかる．このことが，ドリルが $\theta_c=45^\circ$ で求心しやすく，その他の θ_c で求心しにくい（図 6-12）理由と考えられる．

6.6 結言

本章では，小径ドリルが被削面に食い付いた後，主軸回転中心に収束する求心現象について解析と実験により調べた．具体的には，解析モデルの妥当性を実験により確認するとともに，求心性に及ぼす切削条件やドリル先端形状の影響を調べた．得られた結果を以下に示す．

- （１）回転振れのあるドリルで加工するとき，ドリル先端が主軸回転中心方向に求心して行く場合がある．
- （２）ドリル先端中心とシャンク端面中心に回転方向の位相遅れが発生する場合，ドリル先端が求心する．
- （３）本研究で解析対象とした小径ドリルでは，初期切れ刃向き 45° が求心しやすく， 135° が求心しにくい．
- （４）ドリル先端が被削材から受ける力は，被削材材料，送り量，ドリル中心軸の傾き，ドリル先端角により変化し，それが求心性に影響を及ぼす．
- （５）ドリルの切れ刃・チゼルエッジの向きを考慮した切削力解析を行い，移動抵抗の主軸回転中心方向成分の正負によって求心性の良否が判断できることを示した．

第 7 章 結 論

近年では，スマートフォン，タブレット端末，ノートパソコンなどを始めとする電子機器が数多く普及している．これら電子機器に搭載されるプリント配線板には，立体配線を施すためのスルーホールをドリルにより加工する必要がある．しかしながら，製品の小型化・高機能化の要望により，スルーホールが小径化し，プリント配線板が難削材料化している．ドリルの小径化は，従来，太径では無視できた回転振れの影響が無視できなくなり，工具の折損や加工精度の悪化を招いている．また，プリント配線板の難削材料化は，切削温度の上昇により穴壁面品位の悪化を招いている．そこで，本研究ではプリント配線板スルーホールの高品位化と回転振れのある小径ドリルの加工挙動について研究を行った．

本研究で得られた成果をまとめると以下のとおりである．

第1章では，プリント配線板の技術動向や構成材料について概括し，プリント配線板スルーホールに必要な特性を説明した．そして，プリント配線板の穴あけや小径ドリル加工に関連した従来の研究をまとめ，本研究の位置付け，必要性および目的を述べている．

第2章では，プリント配線板のドリル加工特性について述べた．プリント配線板は，被削材がガラス繊維，樹脂および銅箔を含んだ複合材料であるため，ドリル加工現象は一般的な金属のドリル加工と比較して複雑である．そこで，プリント配線板穴加工の基本的な特性を調べるため，高速度カメラや切削抵抗センサを用いてプリント配線板の加工現象を調べるとともに，加工後の穴位置精度や穴壁面粗さを測定した．その結果，プリント配線板材料である銅箔，ガラス繊維および樹脂の中で，銅箔加工時の切削力が最も大きく，その切りくずが穴壁面粗さに影響を及ぼすことを示した．

第3章では，プリント配線板のドリル加工特性に及ぼすエンタリーシーの影響について述べた．プリント配線板のドリル加工では，一般にドリルの食い付き性向上や真直性向上，バリの抑制を目的としてプリント配線

板上面にエントリーシートと呼ばれるアルミニウム製のシートを敷いて加工されている。しかしながら、プリント配線板の加工特性に及ぼすエントリーシートのアルミニウム材料の影響は明らかにされていなかった。そこで、材料の異なる3種類のアルミニウム製エントリーシートを用いて加工実験を行った。その結果、エントリーシートの硬さや引張強さがドリル先端の食い付き性、ドリルの真直性および切りくずの巻き付き性に影響を及ぼすことを明らかにした。

第4章では、穴位置精度に及ぼすエントリーシート樹脂特性の影響について述べた。鉛フリーはんだによる部品の実装温度の上昇や使用環境の温度上昇は、プリント配線板の反りやねじれの発生につながる。これらの対策として、プリント配線板の材料特性を高弾性、低熱膨張にシフトすることで素材が難削材化し、ドリル加工はより困難になっている。そのような中、解決方法の一つとして樹脂付きエントリーシートの使用がある。しかしながら、樹脂付きエントリーシートの穴位置精度に及ぼす樹脂特性の影響について明らかにされていなかった。そこで、特性の異なる2種類の樹脂を塗布したエントリーシートでドリル先端の挙動評価、加工後の穴位置精度測定および切削力の測定を行った。なお、樹脂はポリエチレングリコールを主成分にした樹脂（以下、PEG系樹脂）と植物系ワックスを主成分にした樹脂（以下、wax系樹脂）とした。その結果、PEG系樹脂と比較してwax系樹脂のエントリーシートのほうがドリル先端の求心性が良好であり、穴位置精度が優れることを示した。

第5章では、穴壁面粗さに及ぼすエントリーシート樹脂特性の影響について述べた。プリント配線板スルーホールの代表的なトラブルの一つに穴壁面粗さの悪化がある。穴壁面粗さは、切削温度の上昇や切りくずの排出不良によって増大するものと考えられており、その悪化は、めっきの膜厚が薄くなりやすく、熱膨張により断線を引き起こす要因となる。穴壁面粗さ改善手法の一つとして、樹脂付きエントリーシートを用いた穴加工があるが、樹脂付きエントリーシートの効果に関する報告は少なかった。そこで、PEG系樹脂とwax系樹脂を使い、穴壁面粗さに及ぼす樹脂付きエントリーシートの樹脂特性の影響を調べた。その結果、穴壁面粗さには、樹脂

の融点，ドリル巻き付き性が影響することがわかり，それらが優れるPEG系樹脂付きエントリーシートの穴壁面粗さが良好であることがわかった．

第6章では，回転振れのある小径ドリルの加工挙動について述べた．直径1mm以下の小径ドリル加工ではドリルの偏心などに起因する回転振れが無視できなくなっている．小径ドリル加工における回転振れの発生は，加工精度の悪化や工具折損につながる．そのような中，回転振れのあるドリルが食い付き時から徐々に回転中心に収束して行く現象，いわゆる求心現象が確認されているが，求心時にドリル先端に作用する力の向きや大きさ，あるいはドリル先端形状を考慮した求心現象の解明には至っていない．そこで，有限要素法を利用した切削シミュレーションソフトウェアを用いて，回転振れのあるドリルの被削面食い付き時の切削力とドリル先端移動軌跡を数値計算し，ドリル求心性について調べた．その結果，加工中，ドリル先端中心がシャンク端面中心に対して回転方向の位相遅れが発生する場合，ドリル先端の切れ刃の向きが時々刻々と変化することで被削材から受ける力の向きと大きさが変化し，加工挙動に影響を及ぼすことがわかった．

以上，本論文ではプリント配線板の基本的な加工現象の解明から始まり，加工特性や加工現象に及ぼすエントリーシートのアルミニウム材料，樹脂材料の影響を調べ，エントリーシートに求められる特性を明らかにした．また，回転振れのあるドリル先端の挙動を解析と実験により調べ，加工精度を向上させる求心現象を明らかにしている．本論文の成果は，小径穴の高品位化を実現し，その結果，小型で多機能な製品開発に繋がり，豊かで便利な生活に寄与するものと考えられる．

参考文献

- 1-1) 増沢隆久，高増潔：微細穴加工と計測の最前線，精密工学会誌，**78**，6 (2012) 443.
- 1-2) 伊藤謹司：プリント配線板製造入門，日本工業新聞社，(1995) 4.
- 1-3) 飯田正，白澤久人：高性能機器用プリント基板の最新技術動向，**45**，9(2008)195.
- 1-4) 高野希，福田富雄，尾瀬昌久，村井曜：半導体実装用低熱膨張・高弾性率基板材料，エレクトロニクス実装学会，**3**，3 (2000) 210.
- 1-5) 渡邊英人，津坂英夫，榊田正美：プリント配線板における高速微小穴あけ加工，精密工学会誌，**75**，12 (2009) 1428.
- 1-6) 津枝正介，長谷川嘉雄，木村熙：ドリルの歩行現象について，日本機械学会論文集（第3部），**27**，178 (1961) 816.
- 1-7) 藤井洋，丸井悦男，江馬諭：ドリルのふれまわり振動－第1報，発生機構とチゼルエッジの役割－，日本機械学会論文集（C編），**50**，453 (1984) 898.
- 1-8) 藤井洋，丸井悦男，江馬諭：ドリルのふれまわり振動－第2報，発生限界に及ぼすドリル刃先形状（主として主切れ刃部逃げ面）の影響－，日本機械学会論文集（C編），**50**，453 (1984) 907.
- 1-9) 佐久間敬三，清田宏，森田秀則：ドリル加工における穴位置精度に関する研究－食い付き時の挙動と工具剛性および先端形状の影響－，日本機械学会論文集（C編），**48**，432，(1982) 1275.
- 1-10) 加藤正倫，榎本眞三，斉藤義夫，花岡忠昭：切削開始時のドリル先端部の挙動，精密工学会誌，**56**，8 (1990) 108.
- 1-11) 窪田英毅：ドリル穴加工における穴生成機構の解析，精密工学会誌，**53**，2 (1987) 83.
- 1-12) 甲木昭雄，鬼鞍宏猷，佐久間敬三，吉田裕三，明石忠雄：深穴加工における穴の曲がりに関する研究(切削条件，工具剛性，工具形状および工具摩耗の影響)，日本機械学会論文集(C編)，**58**，546 (1992) 613.
- 1-13) 渡邊英人，津坂英夫，榊田正美：プリント配線板における微細穴あけ加工－ドリルの動的振れと加工特性－，精密工学会誌，**74**，

- 11 (2008) 1204.
- 1-14) H. Watanabe, H. Tsuzaka, M. Masda: Micro drilling for printed circuit boards(PCBs), Precision Engineering, **32**, 10 (2008) 329.
- 1-15) 梶田正美, 木本誠二, 堀内幸, 柴田隆行, 村上良彦:微小穴あけにおけるドリル振れの穴位置精度への影響, 精密工学会誌, **79**, 5 (2013) 449.
- 1-16) 菊池誠, 小石川勝男, 白石昌武:小径ドリルにおける加工状態の制御(第1報, ドリル切刃位置の可制御性と可観察性), 日本機械学会論文集(C編), **70**, 699 (2004) 280.
- 1-17) 菅原章:微小径ドリル加工の切残しに及ぼす二, 三の影響:精密機械, **48**, 3 (1982) 43.
- 1-18) 菅原章, 稲垣耕司:微小径ドリル加工の切残しに及ぼす被削材組織の影響:精密機械, **46**, 10 (1980) 91.
- 1-19) 大幸洋一, 寺林隆夫, 梶田正美:プリント基板の小径ドリル加工(第1報)-切削抵抗からみた切りくず排出機構の解明-, 精密工学会誌, **60**, 12 (1994) 1796.
- 1-20) 中川平三郎, 小川圭二, 木原明博, 廣垣俊樹:プリント基板のマイクロドリル加工温度上昇メカニズム, 精密工学会誌, **72**, 12 (2006) 1494.
- 1-21) 廣垣俊樹, 青山栄一, 井上久弘, 野辺弘道, 郡嶋宗久, 奥野泰和, 片山傳生:プリント基板用 GFRP の小径ドリル加工に関する研究(ガラスクロス基材の繊維束厚さが穴壁面の内部損傷に与える影響), 日本機械学会論文集(C編), **65**, 629 (1999) 382.
- 1-22) 平中誠, 横内弘宇, 李 錫峰, 海藤 耕二, 津坂 英夫:プリント基板の小径穴あけにおける曲がりに関する研究, 精密工学会誌, **59**, 1 (1993) 119.
- 1-23) 大久保修, 稲崎一郎, 青山藤朗, 清水哲:微小径ドリルの折損原因の究明と折損予知に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), **51**, 471 (1985) 2929.
- 1-24) 山羽和夫, 小石川勝男:小径ドリルの折損検出法, 日本機械学会論文集(C編), **54**, 503 (1988) 1547.

- 1-25) 新井亮一，森田昇，西貴仁，長洲慶典，小口京吾，武井持，中山司郎，田中俊宏：切削力検知機構を持つ微細穴加工用センサ・ビルトイン・スピンドルの開発，精密工学会誌，**77**，10 (2011) 944.
- 1-26) 菅原章，稲垣耕司：ドリル加工におけるドリル径の微小化に伴う刃先形状の影響－0.02% C 鋼における切残し－，精密機械，**44**，2 (1978) 41.
- 1-27) 木幡護：マイクロドリルの表面改質，表面技術，**53**，12 (2002) 98.
- 1-28) 赤松猛史：微細深穴加工用ドリル構造の改良とその効果，日立金属技報，**26** (2010) 40.
- 1-29) 南部洋平，落合一裕，堀尾健一郎，金子順一，渡辺武，松田信一：微細深穴加工におけるシンニングによって形成されるチゼルすくい角の影響，精密工学会誌，**77**，7 (2011) 713.

- 2-1) 津坂英夫：特集電子回路基板のドリル・ルータ加工入門，JPCA NEWS March (2010)
- 2-2) 小林正：ぷりんときばんじゅく－新入社員のためのプリント配線板入門－，プリント回路工業会，(1997) 25.
- 2-3) ユニオンツール株式会社，PCB ドリル製品カタログ

- 3-1) 鳥越勝明：PWB のメカニカルドリリング，エレクトロニクス実装学会誌，**2**，4 (1999) 312.
- 3-2) 吉川英一郎，藤澤彰利，岡村康弘，東條毅治：プリント基板加工用アルミ表面潤滑処理材，神戸製鋼技報，**57**，1 (2007) 22.
- 3-3) 佐藤崇弘，片木威，中島義徳，河本継司，大村善彦，田中久隆：プリント基板加工用補助材の開発，第4回軽金属学会中国四国支部講演大会，(2012) 講演番号 29.

- 4-1) 高野希，福田富雄，尾瀬昌久，村井曜：半導体実装用低熱膨張・高弾性率基板材料，エレクトロニクス実装学会，**3**，3 (2000) 210.
- 4-2) 例えば吉川英一郎，藤原直也，川合浩：プリント基板用エントリーボード，神戸製鋼技報，**52**，2(2002)103

- 4-3) 渡邊英人, 津坂英夫, 榊田正美: プリント配線板における微細穴あけ加工ードリルの動的振れと加工特性ー, 精密工学会誌, **74**, 11 (2008) 1204.
- 4-4) H. Watanabe, H. Tsuzaka, M. Masda: Micro drilling for printed circuit boards(PCBs), Precision Engineering, **32**, 10 (2008) 329.

- 5-1) 廣垣俊樹, 中川平三郎, 下河洋平, 井上久弘, 青山栄一, 片山傳生: 赤外線サーモグラフィを用いたプリント基板の小径穴あけ時のドリル温度モニター, 第32回FRPシンポジウム講演論文集, Vol.32nd, (2003) 125.
- 5-2) 佐藤昌彦, 宮崎和智, 田中久隆: 微小切削におけるダイヤモンド工具刃先温度の熱放射計測, 精密工学会誌, **74**, 1(2008) 51.
- 5-3) 木原明博, 中川平三郎, 小川圭二: プリント基板のマイクロドリル加工品質の評価, 2005 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2005) 1257.

- 6-1) 渡邊英人, 津坂英夫, 榊田正美: プリント配線板における微細穴あけ加工ードリルの動的振れと加工特性ー, 精密工学会誌, **74**, 11 (2008) 1204.
- 6-2) H. Watanabe, H. Tsuzaka, M. Masda: Micro drilling for printed circuit boards(PCBs), Precision Engineering, **32**, 10 (2008) 329.
- 6-3) 榊田正美, 木本誠二, 堀内宰, 柴田隆行, 村上良彦: 微小穴あけにおけるドリル振れの穴位置精度への影響, 精密工学会誌, **79**, 5 (2013) 449.
- 6-4) 小野浩二, 河村末久, 北野昌則, 島宗勉: 理論切削工学, 現代工学社, (2003)6.
- 6-5) 大西慶弘: 有限要素法による切削解析ソフトウェア, 精密工学会誌, **76**, 8 (2010) 857.
- 6-6) 岸正彦: 構造解析のための有限要素法実践ハンドブック, 森北出版, (2006) 210.
- 6-7) 吉田総仁: 弾性力学の基礎, 共立出版, (1997) 83.
- 6-8) 崎本達郎: 構造力学, 森北出版, (2012)44.

関連報告

【第2章】

- (1) 佐藤崇弘，田中久隆，佐藤昌彦，中島義徳，河本継司，大村善彦：
プリント基板加工用補助材の開発（第3報） - エントリーシートの樹脂特性と穴位置精度の関係 - ，2012年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2012)145.
- (2) 佐藤崇弘，田中久隆，佐藤昌彦，小出隆夫，中島義徳，河本継司，大村善彦，山本智昭：プリント基板の微細穴加工技術に関する研究 - 樹脂付きエントリーシートによる穴位置精度と穴壁面粗さの改善 - ，精密工学会誌，**79**，No.12，(2013)1229.

【第3章】

- (3) 佐藤崇弘，片木威，中島義徳，河本継司，大村善彦，田中久隆：プリント基板加工用補助材の開発，第4回軽金属学会中国四国支部講演大会，(2012) 講演番号29.

【第4章】

上記(1)と同じ

上記(2)と同じ

【第5章】

上記(2)と同じ

- (4) 佐藤崇弘，山本智昭，田中久隆，佐藤昌彦：プリント基板加工用補助材の潤滑効果について，2012年度精密工学会中国四国支部島根地方学術講演会講演論文集，(2012)13.

【第6章】

- (5) 佐藤崇弘，田中久隆：切削加工シミュレーションソフトを用いた求心作用の解明，2012年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，(2012)501.

- (6) 佐藤崇弘，田中久隆，佐藤昌彦：切削加工シミュレーションソフトを用いた求心作用の解明（第2報） - 工具の向きによる移動抵抗と求心作用の関係 - ，2013年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(2012)501.
- (7) 佐藤崇弘，田中久隆，佐藤昌彦，小出隆夫：回転振れのある小径ドリルの加工挙動（ドリル求心性に及ぼす切れ刃の向きの影響），砥粒加工学会誌，**58**，7(2014)451.

謝 辞

本研究は、筆者が所属する地方独立行政法人鳥取県産業技術センターにおいて、平成15年より着手し、今日に至るまでの成果をまとめたものである。この間、多くの方々にご協力とご支援を賜りました。

本研究をまとめるにあたり、鳥取大学理事・副学長 田中久隆博士，鳥取大学大学院工学研究科教授 小出隆夫博士には終始熱心なご指導と激励を頂き，研究者としての視点，論文のまとめ方など数多くのことを学びました。心から深く感謝いたします。また，鳥取大学大学院工学研究科教授 佐藤昌彦博士，教授 宮近幸逸博士には，研究を進めるにあたり多大なるご支援とご指導を頂きました。深く感謝いたします。

株式会社片木アルミニウム製作所代表取締役社長 片木威博士，取締役工場長 中島義徳氏，大村塗料株式会社代表取締役 大村善彦博士には，本研究を行う上で，研究の社会的意義，業界の動向およびアカデミックな研究を企業現場へ落とし込む手法やその喜びを教えてくださいました。深く感謝いたします。

研究を行う機会を頂き，さらに多大なるご支援とご理解を頂きました地方独立行政法人鳥取県産業技術センター理事長 村江清志氏，また，歴代の産業技術センター役職員である鳥取県産業技術センターセンター長（当時）足森雅己博士，地方独立行政法人鳥取県産業技術センター理事長（当時）稲永忍博士，機械素材研究所所長（当時） 柏木秀文氏に深く感謝いたします。

そして，本研究を進めるにあたり数多くのご助言とご協力を頂きました地方独立行政法人鳥取県産業技術センター機械素材研究所所長 門脇互氏，副所長 鈴木好明氏，機械技術科科長 加藤明博士をはじめとして，産業技術センター職員の皆様に謝意を表します。

2014 年 7 月

佐藤崇弘