

博士論文

プリント基板用 GFRP の小径スルーホール  
ドリル加工における加工穴品質に関する研究

2001 年 5 月

野辺 弘道

# 目次

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第1章 緒論                  | 1  |
| 1-1 研究の背景ならびに本研究の目的     | 1  |
| 1-2 本論文の構成              | 6  |
| 第2章 画像処理による内部損傷の評価方法の提案 | 8  |
| 2-1 緒言                  | 8  |
| 2-2 実験方法                | 9  |
| 2-2-1 被削材及び実験装置         | 9  |
| 2-2-2 画像処理方法            | 13 |
| 2-3 実験結果及び考察            | 18 |
| 2-3-1 内部損傷の異方性          | 18 |
| 2-3-2 内部損傷の統計的処理        | 20 |
| 2-3-3 内部損傷の発生形態         | 23 |
| 2-4 検証実験                | 24 |
| 2-5 結言                  | 27 |
| 第3章 表面損傷と切削抵抗の特徴        | 28 |
| 3-1 緒言                  | 28 |
| 3-2 実験装置及び方法            | 29 |
| 3-3 実験結果及び考察            | 31 |
| 3-3-1 回転角と表面粗さ          | 31 |
| 3-3-2 切削条件が表面粗さに及ぼす影響   | 33 |
| 3-3-3 加工時の切削抵抗          | 36 |
| 3-3-4 切削条件と切削抵抗         | 37 |
| 3-3-5 切削抵抗が表面粗さに及ぼす影響   | 43 |
| 3-4 表面粗さと内部損傷について       | 43 |
| 3-5 結言                  | 44 |
| 第4章 内部損傷の発生形態と加工穴品質の信頼性 | 45 |
| 4-1 緒言                  | 45 |

|       |                                |    |
|-------|--------------------------------|----|
| 4-2   | 実験方法                           | 46 |
| 4-3   | 実験結果及び考察                       | 47 |
| 4-3-1 | 加工条件の損傷幅に及ぼす影響                 | 47 |
| 4-3-2 | 加工穴品質の信頼性                      | 49 |
| 4-3-3 | 下穴の有無による内部損傷への影響               | 53 |
| 4-4   | 結 言                            | 56 |
|       |                                |    |
| 第5章   | ガラスクロスに対する加工穴位置の違いによる加工穴品質への影響 | 57 |
| 5-1   | 緒 言                            | 57 |
| 5-2   | 実験方法及び評価方法                     | 58 |
| 5-2-1 | 被削材及び実験装置                      | 58 |
| 5-2-2 | 内部損傷の評価方法                      | 59 |
| 5-2-3 | 領域の分類                          | 59 |
| 5-3   | 実験結果及び考察                       | 62 |
| 5-3-1 | 加工穴壁面の表面状態                     | 62 |
| 5-3-2 | 加工穴中心位置と損傷の関係                  | 62 |
| 5-3-3 | 繊維束の厚さと繊維角                     | 64 |
| 5-3-4 | 繊維角の内部損傷への影響                   | 65 |
| 5-3-5 | 加工穴中心位置と切削抵抗                   | 67 |
| 5-3-6 | 積層板における切削抵抗                    | 69 |
| 5-4   | 繊維束厚みの異なる材料による実験               | 70 |
| 5-4-1 | 被削材及び実験装置                      | 70 |
| 5-4-2 | 繊維束厚さの違いによる内部損傷への影響            | 72 |
| 5-4-3 | 繊維束位置の違いによる内部損傷への影響            | 72 |
| 5-4-4 | 単位送り量当たりの繊維束厚さが内部損傷に及ぼす影響      | 74 |
| 5-4-5 | 送り量と一回転当たりの損傷幅の関係              | 75 |
| 5-5   | 結 言                            | 77 |
|       |                                |    |
| 第6章   | 切れ刃形状と損傷メカニズム                  | 78 |
| 6-1   | 緒 言                            | 78 |
| 6-2   | 実験装置及び方法                       | 79 |
| 6-3   | 実験結果及び考察                       | 80 |
| 6-3-1 | 一層材の内部損傷の評価                    | 80 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 6-3-2 | 積層板のドリル加工時のスラスト曲線           | 81  |
| 6-3-3 | 回転4次成分と内部損傷の関係              | 83  |
| 6-3-4 | 工具切れ刃及び肩部形状の違いが回転4次成分に及ぼす影響 | 88  |
| 6-3-5 | 工具肩部形状が内部損傷に及ぼす影響           | 90  |
| 6-4   | 結 言                         | 93  |
|       |                             |     |
| 第7章   | 工具摩耗と加工穴品質の変化               | 94  |
| 7-1   | 結 言                         | 94  |
| 7-2   | 実験方法及び評価方法                  | 95  |
| 7-2-1 | 被削材及び実験装置                   | 95  |
| 7-2-2 | 工具摩耗の評価方法                   | 98  |
| 7-2-3 | 加工穴の曲がりの評価方法                | 98  |
| 7-3   | プリント基板加工時の超硬ドリルの摩耗          | 99  |
| 7-3-1 | 切削抵抗の特徴                     | 99  |
| 7-3-2 | 工具摩耗に与える各要因の検討              | 100 |
| 7-3-3 | 工具摩耗と加工穴品質                  | 104 |
| 7-4   | ダイヤモンドコートドリルの特性             | 112 |
| 7-4-1 | コートドリルの特徴                   | 112 |
| 7-4-2 | コートドリルによる加工穴品質              | 115 |
| 7-5   | 結 言                         | 118 |
|       |                             |     |
| 第8章   | 結 論                         | 119 |
|       |                             |     |
| 参考文献  |                             | 122 |
|       |                             |     |
| 謝 辞   |                             | 136 |

## 記号の説明

D : ドリル径(mm)

N : 回転数(rpm)

V : 切削速度(m/min)

F : 送り速度 (mm/min)

f : 送り量( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )

$\gamma$  : 回転角(deg.)

$\theta$  : 繊維角(deg.)

Rmax : 最大表面粗さ( $\mu\text{m}$ )

Dw : 損傷幅( $\mu\text{m}$ )

Fs : スラスト力静的成分(N)

Fd : スラスト力動的成分(N)

Fp : スラスト力最大値(N)

Fb : スラスト力最小値(N)

t : 繊維束厚さ( $\mu\text{m}$ )

tmax : 最大繊維束厚さ( $\mu\text{m}$ )

$\sigma$  : 標準偏差

---

# 第1章

## 緒論

---

本章ではまず本論文に関する研究の背景を述べ、プリント基板の2次加工について今日までに行われてきた研究の概要を述べることにより、本研究の目的を明確にし、本論文の位置付けを説明する。

### 1-1 研究の背景ならびに本研究の目的

携帯電話やノートパソコンなどの携帯情報端末を中心とする電気・電子機器は急激に普及し、IT (Information Technology) の発展により、小型化、軽量化及び多機能化へ進化している。例えば、携帯電話は一昔前には非常に値段が高くセカンドバックほどの大きさであったが、最近では部品点数が数百点あるにもかかわらずポケットサイズにまで小型化が実現しており、だれでもが手に入れることができる価格にまで下がった<sup>[59]</sup>。また、携帯電話は通話を目的とするだけでなく、インターネットに接続し電子メールの送受信やカラー画像によるホームページの閲覧など機能の拡張は益々増加する傾向にある。しかし、機能を拡張することにより、機器の部品数の増加は避けられず、消費者からの要求である機器の軽薄短小化を実現するためには、製造技術のさらなる向上が必要となる。

これらの機器に内装される部品の1つであるプリント基板には絶縁材料が使用され、機器の各機能を実行するために、基板表面及び内部に導電性材料で導体パターンが形成される。さらに基板表面には、IC (Integrated Circuits)、抵抗器、コンデンサやトランジスタなどの電子部品が搭載される。したがって、プリント基板は機器の中核機能を担う非常に重要な部品であり、高品質なものが要求され、また、機器の小型化及び多機能化に伴い、機器に内装される部品数が増大しプリント基板の導体パターン及び部品実装の高密度化が求められる。実装密度はこの10年で4倍近く高密度化している<sup>[34]、[63]</sup>。また、プリント基板は片面板から両面板へ、さらに3層以上の多層板へと移行し、配線

のファインパターン化も急速に進んでいる。よって、プリント基板はますます複雑な構造になり、プリント基板の製造の技術的向上が必要となる。さらに、プリント基板の高密度化に相まって様々な環境での使用に耐えうる優れた電氣的信頼性が必要不可欠となる<sup>[42],[46],[50]</sup>。

プリント基板の絶縁材料は、これまで民生用として紙基材フェノール樹脂を用いてきたが、現在では民生用・産業用ともにFRP (Fiber Reinforced Plastics) が多用されており、中でもガラスクロス基材エポキシ樹脂銅張積層板が広く使用されている<sup>[30],[36],[169],[173]</sup>。プリント基板は製品とするために、製造工程で穴あけ加工や外形加工など様々な2次加工が施されるが、特にスルーホール<sup>註1</sup>のための小径ドリル加工は、回路を形成する重要な加工工程であり1製品に非常に膨大な数の穴あけ加工を要する。その上、形成された回路は機器の中核機能を担うため、穴あけ加工のミスは許されず、加工穴品質の信頼性向上が望まれている。また、携帯電話などの機器の小型化に伴い、プリント基板の実装密度が向上し、スルーホールの小径化<sup>[33],[49],[53]</sup>及びファインピッチ化<sup>[48],[58],[61]</sup>が進み、スルーホールには高い電氣的接続の信頼性の確保が困難となるため、より精密な加工が要求される<sup>[57]</sup>。

FRPは比強度・比剛性に優れており軽量材料として、電気・電子分野だけでなく、航空・宇宙分野<sup>[123],[124]</sup>、建設分野<sup>[125]</sup>や船舶分野<sup>[185]</sup>などあらゆる分野で使用されている。そして、その種類も豊富で、強化材としては、ガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維、ポロン繊維、母材としてはエポキシ、ポリイミド、不飽和ポリエステルなどが挙げられ、特に使用されているFRPは母材をエポキシ樹脂とし、ガラス繊維及び炭素繊維で強化されたものである。これらのFRPは構造部品としての用途が幅広く、様々な形状に一体成形される。構造部品は安全性や信頼性が求められるため、成形加工<sup>[126],[133],[135]</sup>に関する研究や材料の機械的特性を調査<sup>[188]</sup>するための引張試験<sup>[79],[129],[132]</sup>、圧縮試験<sup>[131],[136]</sup>、疲労試験<sup>[127],[128],[130]</sup>、衝撃試験<sup>[80],[81]</sup>、座屈試験<sup>[134]</sup>などを行う研究は多くある。また、寿命推定や破壊挙動を解明する有限要素法を用いた損傷シミュレーション<sup>[103]-[122]</sup>についてもいまままでに数多く研究されている。構造部品としてのFRPはその形状が複雑で、高い精度を要する場合、半製品からの2次加工(切削加工)が必要となる。また、前述したようにプリント基板の絶縁材料として主に使用されるFRPも回路形成のために、2次加工である穴あけ加工が必要となる。FRPの2次加工に関する研究は、旋盤加工により加工面品質<sup>[69]</sup>や切削機構<sup>[74],[76],[77],[157]</sup>や工具の摩耗特性<sup>[82],[84]</sup>を調べたもの、エンドミルによって端面加工を行ったときの加工特性<sup>[73]</sup>を調べたもの、研削加工による加工面生成

註1 穴を用いた導体層相互の接続。プリント基板の外層及び内層回路間の導通を行うため、ドリルによって貫通穴をあけ、銅メッキによって導体を形成した穴。電氣的に接続をするとともに、挿入実装の場合は部品の端子を挿入し固定するために用いる<sup>[171]</sup>。

機構を解明<sup>[71]</sup>したものなどがある。FRPのドリル加工の研究に関しては、例えばSHIH-CHIEH LINら<sup>[141]</sup>は異なる工具形状が加工穴品質に及ぼす影響について研究したものや、G.R.Bishopら<sup>[144]</sup>やJoseph A.Miller<sup>[147]</sup>は数種の異なる形状の工具を使用したときの切削抵抗を測定し切削特性を調査している。また、G.CAPRINOら<sup>[137]</sup>、V. Chandrasekharanら<sup>[149]</sup>はドリル加工中の被削材と工具の位置を時間的に区切り、位置(深さ)ごとに損傷の発生メカニズムを解明している。しかし、その数はFRP構造部品の材料の機械的特性を研究したものに比べ非常に少なく<sup>[64],[182]</sup>、特に高品質な加工穴を要するプリント基板用GFRPのスルーホール小径ドリル加工の研究については、プリント基板製造のコスト面及び品質面での比重が高いにもかかわらず文献や資料が極めて少ない<sup>[40],[65],[139],[189]</sup>。また、これまでの研究も加工表面の観察のみであり、加工面よりもさらに奥に進行していると考えられる内部損傷の評価には至っていない。そこで本研究では、多用されているプリント基板用GFRPのスルーホール小径ドリル加工について加工穴品質の向上を目的とし、加工表面からの損傷の評価に加え内部損傷の新しい評価方法を提案しその手法を用いて、加工条件を変化させて加工穴品質への影響を調査した。

プリント基板用GFRPはガラスクロスとエポキシ樹脂という全く機械的特性の異なる材料から構成されている。そのため、小径ドリル加工を施すと、加工穴壁面にガラス繊維の掘り起しやガラスクロスとエポキシ樹脂の界面はく離等の損傷が発生する。ガラスクロスは強い方向性を有するため損傷は一様に発生するのではなく、異方性のある発生形態となる。また、これらの損傷は加工穴品質に悪影響を及ぼし、プリント基板の信頼性を著しく低下させる。そこで、これらの損傷の発生形態を詳細に調べ、その要因を掴むことが重要であると考えられる。

機器の小型化に伴い、プリント基板の穴密度も増大し導体パターンの縮小化技術が向上しているが、加工穴品質の中で絶縁信頼性の問題が新たにクローズアップされている。特に、その絶縁信頼性の劣化要因としてイオンマイグレーション<sup>註2</sup>が問題とされている。ガラスクロス基材では、スルーホールメッキされた銅が穴壁面からガラス繊維とエポキシ樹脂との界面に沿って進行することが知られている<sup>[55],[175]-[180],[182],[183]</sup>。この現象により、回路がショートし、機器の致命的な故障になる可能性があるため、ガラス繊維束内でエポキシ樹脂との界面はく離等の内部損傷が問題となっている。イオンマイグレーション

註2 プリント基板の内層や外層の絶縁基板上に異物が付着し、湿度が高い状態で、導電性の通路ができ、電界の存在で絶縁基板上の導体の間や異なる導体層の間を金属イオンが移動し金属が析出する現象。析出したイオンは樹枝状に成長する。導電性のある通路として加湿などにより表面に形成された水分を持つ膜、内装で微細クラックに水分の満たされたものなどがある。プリント基板にマイグレーションを引き起こす要因があるとき、高温高湿の環境下で長い期間使用を続けると絶縁劣化が発生し、さらに進行すると短絡に至る<sup>[168]</sup>。  
イオンマイグレーション発生の対策としては、プリント基板製造時の洗浄を完全に行なう、残留しているイオン類を限界に近い感度で検出する、銀を使用している電子部品を使用しない、等が挙げられ、環境条件としては使用時の温度範囲で結露が発生しないことを確認することが必要である<sup>[192]</sup>。

シヨンの発生形態についての研究<sup>[23]-[28],[31],[32],[37],[38],[52],[54]</sup>は数多くされているが、イオンマイグレーションに結び付く加工穴周辺の内部損傷についての研究は少なく、内部損傷の観察が困難であるためその評価方法は確立されていない。また、クロス材の穴あけ加工では切削方向と繊維方向が常に変化しており、1つの加工穴で壁面の位置により内部損傷の発生形態が異なる。したがって、その評価方法として定量的かつ統計的な手法を構築することが必要である。さらに、内部損傷の発生規模と発生形態を把握することで、スルーホールピッチの目安になると考えられ、信頼性と伴に実装密度の向上につながる。そこで本研究では、ガラス繊維とエポキシ樹脂の光透過性に着目し、透過光を利用した<sup>[70]</sup>GFRPの内部損傷の新しい評価方法を提案し構築した。

一方、プリント基板はガラスクロスとエポキシ樹脂という異なる材料構成であるため、鉄やアルミ等の均質な金属材料の加工穴<sup>[19],[66],[98]-[101]</sup>と違って、ガラスクロスの方向性により加工穴壁面にガラス繊維の掘り起し等の表面損傷が発生する。ガラスクロスは直交する縦糸と横糸から構成されるため、切削方向とガラスクロスのなす角は縦方向と横方向が存在し、縦糸と横糸の切削状態に差が生じるため、加工穴壁面の表面粗さが増大し、次工程のメッキ加工でメッキ層の析出が不均一になったり<sup>[47]</sup>、メッキの密着性が低下しスルーホールに発生する熱応力でメッキのクラックや断線という不良を引き起こし、回路の長期信頼性の保証に悪影響を及ぼす<sup>[29],[35],[43],[44],[60],[62],[155]</sup>。したがって、回路接続のためのメッキが施されるスルーホール壁面に発生するガラス繊維の掘り起しの発生機構を解明することは、プリント基板の回路接続の信頼性向上に役立つものと考えられる。しかし、GFRPの表面粗さに関する研究は、例えば王ら<sup>[72],[75]</sup>や竹内ら<sup>[78]</sup>は2次元切削により切削方向と繊維方向の関係から加工生成面の発生メカニズムを解明しており、加工生成面が悪化する時の切削方向と繊維方向を示している。また、C.W.Wernら<sup>[142]</sup>は一方方向性材料を用いたドリル加工で加工穴壁面のドリル送り方向の表面粗さを切削方向と繊維方向の関係に着目して測定している。これらの研究の結果より、切削方向と繊維方向に着目することは加工面の損傷状態を考察するのに有効であることを示しているが、加工時の切削抵抗と損傷との関係を調べるまでには至っていない。そこで本研究では、ドリル加工された加工穴壁面の表面粗さとドリル加工時の切削抵抗との関係を詳細に調べ、切削抵抗を動的成分及び静的成分に分けることによりGFRPの切削特性を考察する。

また、表面的な損傷だけでなく、上述のイオンマイグレーションの問題より内部損傷の発生形態を解明することが加工穴品質向上のためには重要であるが、GFRPのドリル加工での内部損傷についての研究は極めて少ない。さらに、ドリル加工時の切削条件及び切削力と表面粗さ、内部損傷の関係を定量的に論じているものは皆無である。そこで本研究では、切削条件を変化させて内部損傷を定量的に測定し、その発生形態を明確にするとともに切削条件が内部損傷に及ぼす影響を調べた。

クロス材のドリル加工では、切削方向と繊維方向の関係が一定ではない<sup>[67]</sup>ため、加工穴の内部損傷の発生形態は大きくばらつく。内部損傷の発生形態のばらつきに対しての研究は全くされておらず、このばらつきを分類し定量的に評価することは内部損傷の発生メカニズムを解明するとともに加工穴品質の信頼性向上のために重要であると考えられる。本研究では、内部損傷の発生形態のばらつきの原因の一つとして加工穴中心とガラスクロスの相対位置に着目して、ガラスクロスに対する加工穴中心の位置を分類することによって、内部損傷の発生形態を明らかにする。

ドリルは接触加工であるため、非接触加工であるレーザ加工<sup>[5],[11],[13],[15],[45],[51],[140],[152]-[154]</sup>とは異なり、ガラス繊維との摩擦によりドリル先端部の摩耗による加工穴品質の低下は避けられない。上述したようにプリント基板の穴あけ加工では膨大な数の穴あけを要するため、工具摩耗により加工穴壁面の表面粗さ及び内部損傷の増大、スミア<sup>註3</sup>の発生<sup>[39],[41]</sup>、穴位置精度の低下によるスルーホールのランド<sup>註4</sup>からはみ出しなどの加工穴品質の劣化を招く。工具摩耗に関する研究では、例えば佐久間ら<sup>[86],[87]</sup>は二次元切削による工具の摩耗特性と加工生成面などを調査している。S.K. MALHOTRA<sup>[143]</sup>やT. Radhakrishnanら<sup>[146]</sup>はドリル加工による加工回数と工具摩耗及び切削抵抗の関係を考察している。しかし、摩耗現象を調べながら内部損傷を含んだ加工穴品質を評価した報告はほとんどされていない。そこで本研究では、工具摩耗のメカニズムを解明し、工具摩耗が内部損傷に及ぼす影響を調べ、さらに工具の長寿命化を目的として開発されたダイヤモンドコートドリルの摩耗特性を調査し、ダイヤモンドコートの有効性を調査した。

以上のような観点から、本論文ではガラスクロス基材エポキシ樹脂積層板の小径ドリル加工を用いた加工穴品質の改善を目的として、エポキシ樹脂とガラス繊維の光透過性に着目し、一層材を用いた加工穴周辺に発生する内部損傷の評価方法を提案し構築した。この評価方法を用いて定量的かつ統計的に内部損傷を評価し、その発生メカニズムを解明する。また、切削条件と内部損傷及び表面粗さの関係を調べ、特に切削力が損傷に及ぼす影響について検討し、工具の先端形状の違いによる切削力の時間的変化及び内部損傷への影響も調べた。損傷のばらつきについては、ドリル中心とガラス繊維束との相対位置関係に着目し、加工穴壁面の内部損傷の特徴を詳細に検討した。最後に、工具摩耗による切削力及び内部損傷の変化を調べた。

註3 積層板に穴あけ加工したとき、樹脂が溶融、フローしてスルーホール内に露出し、導体上に付着することによる樹脂の汚れ。ドリルで穴あけをした場合、ドリルと導体層や積層されたガラス布エポキシ樹脂などの絶縁基板との間の摩擦熱で樹脂が溶融して導体表面に付着するのが原因とされている。信頼性の高い接続を得るためには、この物質は銅を析出させる前に除去する必要がある。最近では、デスマミア工程が標準的に取り入れられ、穴あけ条件もスミア発生が少ない条件に設定されている<sup>[172]</sup>。

註4 プリント配線板の導体パターンで配線用パターンの先端、あるいは中間に設けた丸形又は角形のパターン。挿入実装方式のプリント配線板ではこの部分に穴をあけてスルーホールを形成して、層間接続や部品の端子の挿入に使用する。表面実装方式では部品端子用のパッドや層間接続の穴をあけて使用する<sup>[168]</sup>。

## 1-2 本論文の構成

本論文では、本章を含めて全8章からなる。その構成は次のとおりである。

第2章では、ガラス繊維とエポキシ樹脂の光透過性に着目し、ガラスクロス一層材を使用することにより加工穴周辺に発生する内部損傷を評価するために、画像処理システムを提案し構築する。まず、一層材の内部損傷の顕微鏡写真を観察しその発生形態に大きなばらつきがあることを示し、内部損傷を評価するためには統計的手法の必要性があることを述べる。次に、画像処理を使用した評価方法により、今までの超音波顕微鏡によるGFRPの内部損傷の観察と比較して、明確に観察され迅速に、定量的及び統計的に処理可能であることと、そのシステムの概要及び処理方法について述べている。切削方向とガラス繊維方向の関係に着目して加工穴の壁面の位置を定義することにより、加工穴毎の内部損傷の発生形態を明確にしている。また、画像処理を利用することにより、内部損傷が高精度で定量的に処理可能であることを証明している。さらに、同一条件で加工された加工穴のいくつかの内部損傷を画像処理により定量化して、その発生形態を比較検討する。統計的手法による内部損傷の評価方法についても述べている。また、一層材で積層板の内部損傷を再現可能であることも検証している。

第3章では、従来の研究で調査されている表面粗さを加工穴品質として取り上げ、切削条件が表面粗さに及ぼす影響についてさらに詳細に調査する。まず、加工穴壁面のSEM写真を観察し穴縁の位置による損傷状態を確認し、ドリル送り方向の最大表面粗さを測定している。切削条件を変化させた時の加工穴壁面の損傷状態を観察し、最大表面粗さを測定し、切削速度よりも送り量が加工穴壁面の損傷に影響を及ぼすことを明らかにしている。さらに、GFRPの加工メカニズムの検討のために、加工時の切削抵抗を測定しその特徴を検討し、特にドリル送り方向の切削力であるスラスト力を取り上げ、スラスト力を静的成分と動的成分に分けることにより、切削抵抗と表面粗さとの関係を考察する。また、ドリルの切れ刃部及びチゼル部が切削抵抗と表面粗さに及ぼす影響を調べるために切削条件を変化させて下穴実験を行う。

第4章では、内部損傷を加工穴品質として取り上げ、プリント基板のドリル加工の内部損傷の発生形態の特徴を調べる。まず、ガラスクロス一層材の顕微鏡写真を観察し、加工穴周辺の内部損傷の発生形態を確認する。次に、第2章で構築した画像処理システムを利用して切削条件を変化させて内部損傷に及ぼす影響について調べる。また、加工穴品質の信頼性の一指標として内部損傷のばらつきを取り上げ切削条件が内部損傷のばらつきに及ぼす影響についても調査している。さらに、ドリルのチゼル部及び切れ刃部の内部損傷への影響を見るために下穴実験も行い、内部損傷の発生形態及びばらつきを明らかにする。

第5章では、第2章及び第4章でも示した内部損傷の発生形態のばらつきの原因としてドリル中心と繊維束との相対位置関係に着目し、加工穴周辺に発生する内部損傷と切削抵抗の特徴を検討する。まず、加工穴中心が位置する領域を定義し、領域ごとに内部損傷の発生形態に違いがあり、それぞれの領域で特徴があることを明らかにしている。次に、内部損傷に影響する要因として、切削方向と繊維方向との関係に加え、切削部の繊維束厚さに着目し内部損傷との関係性を評価している。また、領域ごとに切削抵抗を測定し、その特徴について述べている。さらに、繊維束の厚さが異なる材料をドリル加工し、繊維束厚さと内部損傷の関係について調べ、切削部の繊維束厚さと送り量の間から内部損傷の近似式を導き出す。

第6章では、前章までは損傷について材料側からの考察をしており、工具形状に関しては考慮していないため、加工時の切削抵抗とドリル加工中の工具の垂直方向の位置との関係を時間的に詳細に調べ、内部損傷との因果関係について検討する。また、ドリル加工時のガラス繊維とエポキシ樹脂の積層構成に注目し、損傷の受ける繊維が樹脂の上部及び下部にある場合の損傷の深さについて有限要素法を用いて考察している。次に、ドリル急停止実験を行った時の内部損傷の発生形態を観察し、最終的に加工穴壁面を加工し内部損傷発生要因となる工具の部位を特定する。さらに、内部損傷の発生要因とされる工具の部位から、工具形状の違いによる切削抵抗の変化と内部損傷への影響を明らかにし、内部損傷を低減する工具形状について考察する。

第7章では、第2章～第6章までは加工穴数初期段階での加工穴品質の評価のみであり工具摩耗については考慮していないため、それらの評価に加え工具の加工穴数の増加による切削抵抗の変化、工具摩耗及び加工穴品質について調査する。次に、送り量を変化させて、加工穴数と工具摩耗の関係を調べる。また、加工穴数を増加させたときの内部損傷及び穴の曲がりの変化を調査する。さらに、加工初期段階と加工穴数が増加したときの内部損傷の顕微鏡写真を観察して、工具摩耗による切削メカニズムへの影響について考察する。また、長寿命化及び高い耐摩耗性に優れているダイヤモンドコートドリルを使用し、ダイヤモンドを工具にコーティングすることによって摩耗特性と加工穴品質をコート無ドリルと比較し評価している。

第8章では、本研究で得られた成果をまとめている。

## 第2章

### 画像処理による内部損傷の評価方法の提案<sup>[1],[184]</sup>

プリント基板用 GFRP のスルーホールドリル加工では、加工穴周辺に内部損傷が発生する。この内部損傷によりイオンマイグレーションが誘発する可能性があり、回路接続の信頼性を著しく低下させる。そこで本章では、GFRP のドリル加工穴周辺に発生する内部損傷の新しい評価方法について述べている。まず、ガラス繊維とエポキシ樹脂の光透過性に着目し画像処理を用いた評価システムを提案及び構築し、そのシステムの処理方法について説明する。次に、GFRP の内部損傷を評価するためには定量的かつ統計的に調べる必要があることを示し、本研究で構築した画像処理システムが GFRP の内部損傷の評価に有効であることを述べている。

#### 2-1 緒言

GFRP はエポキシ樹脂とガラス繊維という機械的特性の異なる材料から構成されるため機械加工を施すと加工表面及び内部に損傷が発生する。特に、クロス材の穴あけ加工では縦糸と横糸の切削状態の差により表面損傷であるガラス繊維の掘り起しやエポキシ樹脂とガラス繊維の界面はく離等の内部損傷が発生する。プリント基板では穴あけ加工後のメッキ工程で、ガラス繊維の掘り起しにより不連続メッキや断線などの不良の原因となる。また、内部損傷であるガラス繊維とエポキシ樹脂のはく離により繊維に沿って進行するイオンマイグレーション発生により異なる導体層を接続してしまう可能性がある<sup>[23]</sup>。したがって、穴あけ加工時のこれらの損傷は、電気・電子機器の致命的な故障につながり、機器の信頼性低下の要因となり非常に重大な問題である。

表面損傷であるガラス繊維の掘り起しについては、過去に多く研究されており<sup>[71],[75]</sup>、<sup>[150]</sup>、損傷の評価方法も確立されている。表面損傷の観察には、電子顕微鏡が使用され損傷状態を鮮明に観察可能である。また、表面状態の測定には表面粗さ測定器が用いられ、主に最大表面粗さ ( $R_{max}$ ) が測定される。しかし、GFRP の内部損傷についてはこれ

までに超音波顕微鏡によって観察したものがあるが、超音波顕微鏡から得られる画像は不鮮明であり、高精度で定量的な測定が困難である。また、その設備導入費及び維持費が高額である。したがって、内部損傷については上記のような問題が起こるため、その発生形態の解明のための新しい評価方法の確立が必要とされている。

そこで本章では、内部損傷の評価方法として、ガラス繊維とエポキシ樹脂の光透過性に着目し、ガラスクロス一層材を用い画像処理システムを提案し構築した。まず、画像処理システムの概要及び方法について説明する。そして、画像処理システムを使用して得られた加工穴周辺に発生する内部損傷の画像から定量的に損傷を測定し、その発生形態を定量化し考察する。また、内部損傷の発生形態の傾向を見るために統計的手法を用いて評価した。

## 2-2 実験方法

### 2-2-1 被削材及び実験装置

実験に使用した被削材は、ガラスクロス基材エポキシ樹脂板で最も多用されているJIS-GE4Fとした。ガラスクロスは7628( IPC-EG-140の規格名称)で、ガラス繊維はEガラスを使用している。板厚1.6mm(ガラスクロス積層数8層)の積層板と板厚0.2mm(ガラスクロス積層数1層)の一層材を用いた。Table 2-1にEガラスの諸特性<sup>[164],[165]</sup>を、Table2-2にガラスクロスの諸特性を、Table2-3にエポキシの諸特性<sup>[166],[167]</sup>を示す。

穴あけは遠州工業社製立フライス盤(TYPE ENSHU-V1)の主軸に日本精密工作社製のハイスピンドルモーター(HS-220)を取り付けてドリル加工を行った。Fig.2-1に実験装置の外観写真を示す。工具はMMCコベルコツール社製プリント基板用超硬ドリル(KUM100,直径1mm)である。ドリルの形態は加工中の熱発生が少ない、スミアやネイルヘッド等の品質不良を低減するアンダーカットタイプ<sup>[156]</sup>である。Fig.2-2に使用したドリルの主要寸法を、Table2-4に仕様を示す。

実験においてはFig.2-3に示すように、通常のプリント基板の穴あけ時と同様にドリルの振れを抑え、入り口部のバリを防ぐために上部当て板としてアルミニウム板(板厚0.2mm)を、ドリルの破損及び出口部のバリを防ぐために下部当て板としてベークライトを使用した。出口部で当て板無しでドリル加工を行った場合には、ドリルチゼルの推力で穴出口部の方向にガラス繊維がはく離することが知られている<sup>[156],[158],[159],[160]</sup>が、本加工では十分な当て板で保持することで、このようなはく離を防止してある点が特徴である。また、一層材は上部当て板と積層板の間に挟んで同時に加工した。これにより、積層板と一層材の切削状態は一致していることになる。Table2-5に切削条件を示す。また、穴あけ実験は乾式加工で行い、加工回数の増加から工具摩耗によるデータへの影響

を低減するために、工具は2～3回のならし加工を行った後に使用し、加工回数は50回を上限とした。

一層材の内部損傷の観察にはニコン社製実体顕微鏡 (SMZ-U) を使用し、画像処理は実体顕微鏡に日本ビクター社製 CCD (Charge Coupled Device) カメラ (TK-1070) を取

Table 2-1 Properties of E-glass.

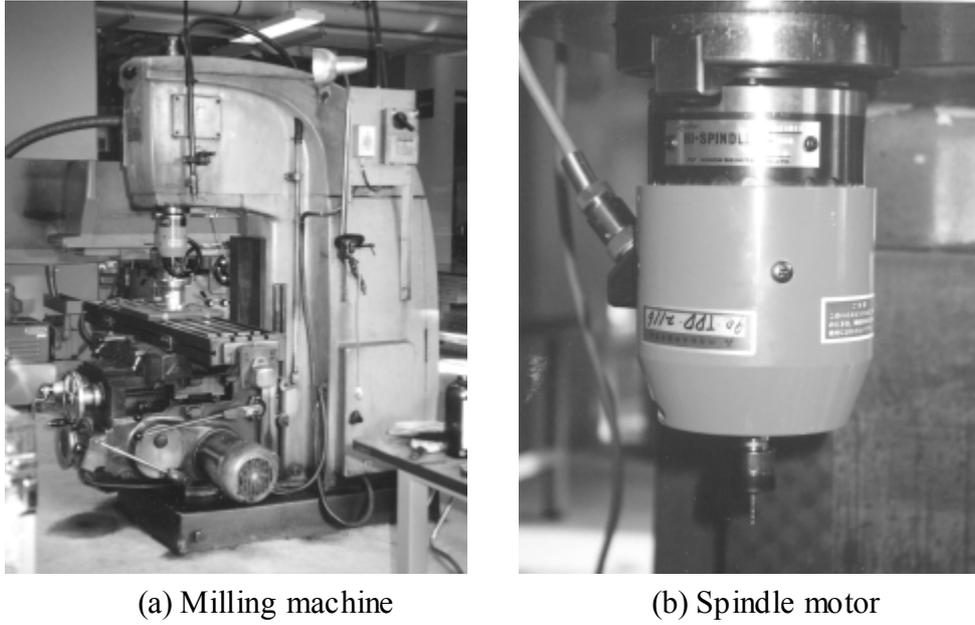
|   |                     |       |
|---|---------------------|-------|
| <i>Young's modulus</i>                  | GPa                 | 76    |
| <i>Poisson's ratio</i>                  |                     | 0.22  |
| <i>Elongation percentage</i>            | %                   | 4.8   |
| <i>Specific heat</i>                    | kJ/(kg K)           | 0.825 |
| <i>Coefficient of thermal expansion</i> | 10 <sup>-6</sup> /K | 5     |
| <i>Thermal conductivity</i>             | W/(m K)             | 1.04  |
| <i>Softening point</i>                  | K                   | 1113  |

Table 2-2 Properties of glass cloth.

|  |                  |    |                 |
|--|------------------|----|-----------------|
| <i>Material</i>  |                  |    | IPC-EG-140 7628 |
| <i>Diameter of filament</i>                                |                  | μm | 9               |
| <i>Width</i>   | <i>Warp yarn</i> | μm | 510             |
|  | <i>Weft yarn</i> | μm | 580             |
| <i>Thickness</i>   | <i>Warp yarn</i> | μm | 93              |
|  | <i>Weft yarn</i> | μm | 95              |
| <i>Number of filaments</i>                                 | <i>Warp yarn</i> |    | 400             |
|  | <i>Weft yarn</i> |    | 400             |
| <i>Density of glass cloth (Warp yarn Weft yarn / 25mm)</i> |                  |    | 42 32           |

Table 2-3 Properties of epoxy.

|                               |         |       |
|-------------------------------|---------|-------|
| <i>Young's modulus</i>        | GPa     | 1.81  |
| <i>Modulus of rigidity</i>    | GPa     | 0.671 |
| <i>Poisson's ratio</i>        |         | 0.374 |
| <i>Glass transition point</i> | K       | 435   |
| <i>Thermal conductivity</i>   | W/(m K) | 0.669 |



(a) Milling machine

(b) Spindle motor

Fig.2-1 Experimental unit.

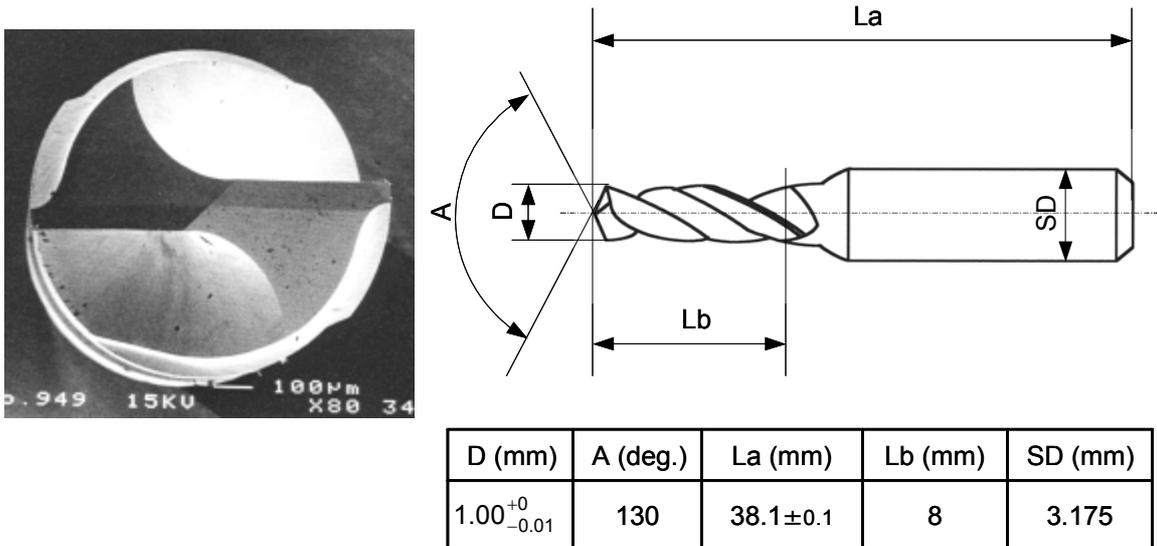


Fig.2-2 Dimensions of drill.

Table 2-4 Properties of drill.

|                            |                    |      |
|----------------------------|--------------------|------|
| <i>Material</i>            | —                  | K10  |
| <i>Density</i>             | g/cm <sup>3</sup>  | 14.9 |
| <i>Hardness</i>            | H <sub>RA</sub>    | 92.5 |
| <i>Transverse strength</i> | kg/mm <sup>3</sup> | 240  |

Table 2-5 Cutting condition.

| <i>Spindle speed</i> | <i>Cutting speed</i> | <i>Feed speed</i> | <i>Feed rate</i> |
|----------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| N rpm                | V m/min              | F mm/min          | f μm/rev         |
| 1503                 | 4.7                  | 24                | 16               |
|                      |                      | 30                | 20               |
|                      |                      | 36                | 24               |
| 5000                 | 15.7                 | 26                | 5                |
|                      |                      | 80                | 16               |
|                      |                      | 100               | 20               |
|                      |                      | 120               | 24               |
|                      |                      | 154               | 28               |
|                      |                      | 234               | 46               |
|                      |                      | 318               | 63               |
| 7000                 | 22.0                 | 112               | 16               |
|                      |                      | 140               | 20               |
|                      |                      | 168               | 24               |
| 9000                 | 28.3                 | 144               | 16               |
|                      |                      | 180               | 20               |
|                      |                      | 216               | 24               |

$$V = \frac{\pi DN}{1000}$$

$$f = \frac{F}{N} \times 10^3$$

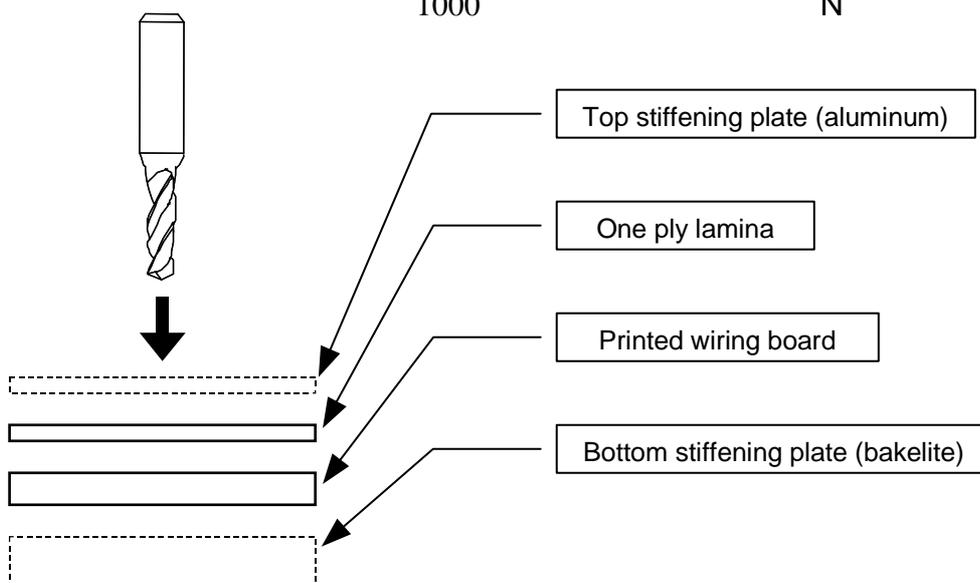


Fig.2-3 Experimental method.

り付け，ピアス社製画像処理装置（PIAS- ）を使用した．使用した CCD カメラの有効画素数は 768（水平）× 493（垂直）である．加工穴の仕上げ面粗さの測定には小坂研究所社製のサーフテスター（SE-30C 型）を用い，ドリル送り方向に測定し，粗さの最大値  $R_{max}$ （peak to peak）を求めた．

### 2-2-2 画像処理方法

一層材の加工穴に光を透過させると，ガラス繊維とエポキシ樹脂の界面はく離等の損傷部分で光が散乱するため，透過する光量が減少し穴周辺に黒く写し出される部分が生じる．この性質を利用して，画像処理を使用した内部損傷の評価システムを提案し構築した．Fig.2-4<sup>[22]</sup>は超音波顕微鏡及び光学顕微鏡を使用して測定した積層板と一層材の内部損傷を示したものである．Fig.2-4における損傷幅は加工穴中心から損傷域の最大距離と加工穴半径との差である．Fig.2-4より，超音波顕微鏡による積層板と一層材の損傷幅及び光学顕微鏡による一層材の損傷幅はほぼ一致していることが分かる．したがって，この透過光を利用して観察される損傷の外形は，超音波顕微鏡による繊維束の界面はく離の観察結果とほぼ一致する．以下に内部損傷を評価するための画像処理システムについて説明する．

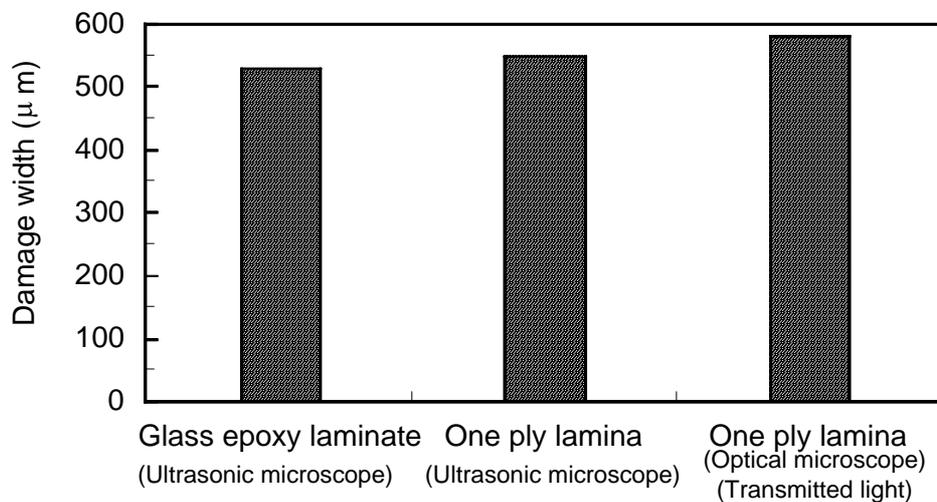


Fig.2-4 Damage width measured using ultrasonic and optical microscopes.

Fig.2-5の画像処理システムに示すように，加工した一層材を実体顕微鏡により拡大し透過光を当て，その画像を CCD カメラにより画像処理装置に取り込む．取り込まれた画像をモニターで観察しながら，パーソナルコンピュータにより画像処理装置を制御し処理する．Fig.2-6に画像処理方法の流れ図を，Table2-6に画像処理装置の仕様を示す．CCDカメラから送られるモノクロ画像は輝度階調が 256 階調 [輝度値 0（黒）～輝度

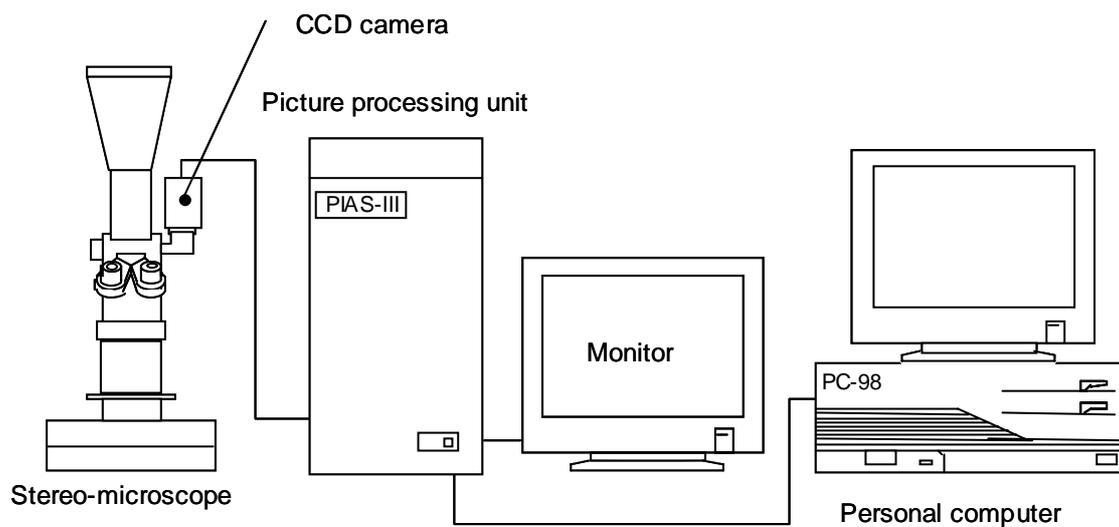


Fig.2-5 Image processing system.

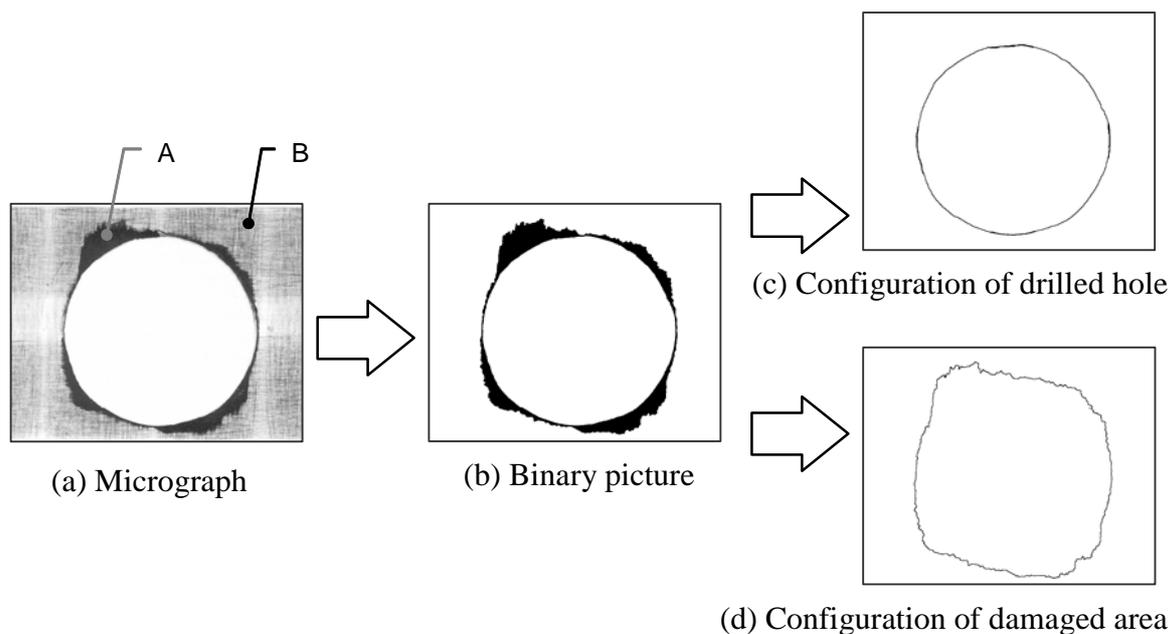


Fig.2-6 Image processing method.

Table 2-6 Specifications of picture processing unit.

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| <i>Resolution</i>              | 512 512              |
| <i>Luminance resolution</i>    | RGB:8 bits 256 level |
| <i>Aspect ratio</i>            | 1:1                  |
| <i>Picture memory capacity</i> | 12 planes            |

値 255 (白)], 解像度が 512 (水平) × 512 (垂直) 画素で, 全ての画素に輝度値が与えられる。縦と横の画素比は 1 : 1 で一画素当たりの大きさは約 3 × 3 $\mu$ m と設定している。画像入力時の透過光の輝度値 (光源の強さ) は画面中央付近で 250 ~ 255 に設定しており, 加工穴の画像を画像処理装置に入力後, その画像に 2 値化処理を行う。この時, 2 値化処理のしきい値を輝度値 128 に設定しているので, 輝度値 128 以上の画素は輝度値 255 (白) に, 輝度値 127 以下の画素は輝度値 0 (黒) に変換される。損傷を受けた箇所 (Fig.2-

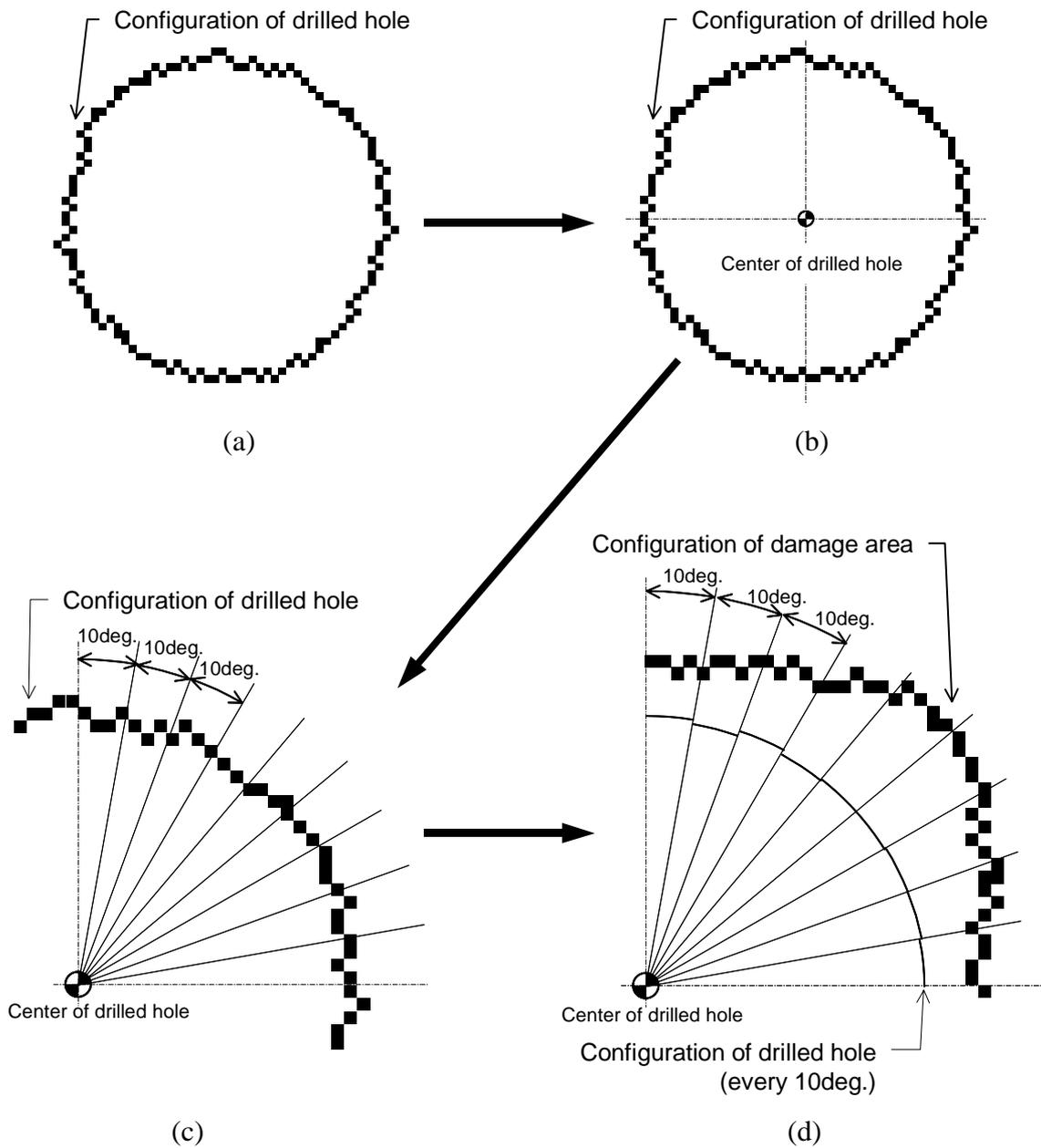


Fig.2-7 How to estimate the damage width.

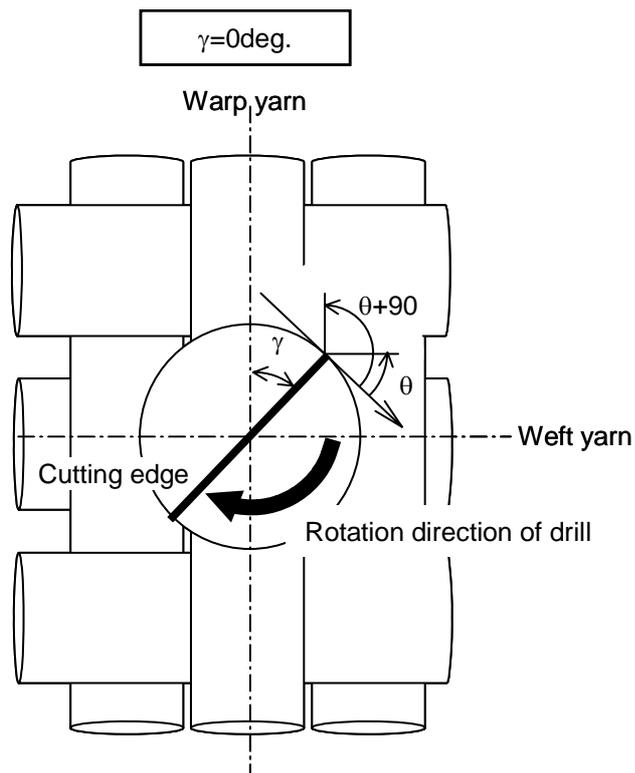


Fig.2-8 Rotation angle ( $\gamma$  deg.) and fiber angle ( $\theta/\theta+90$  deg.).

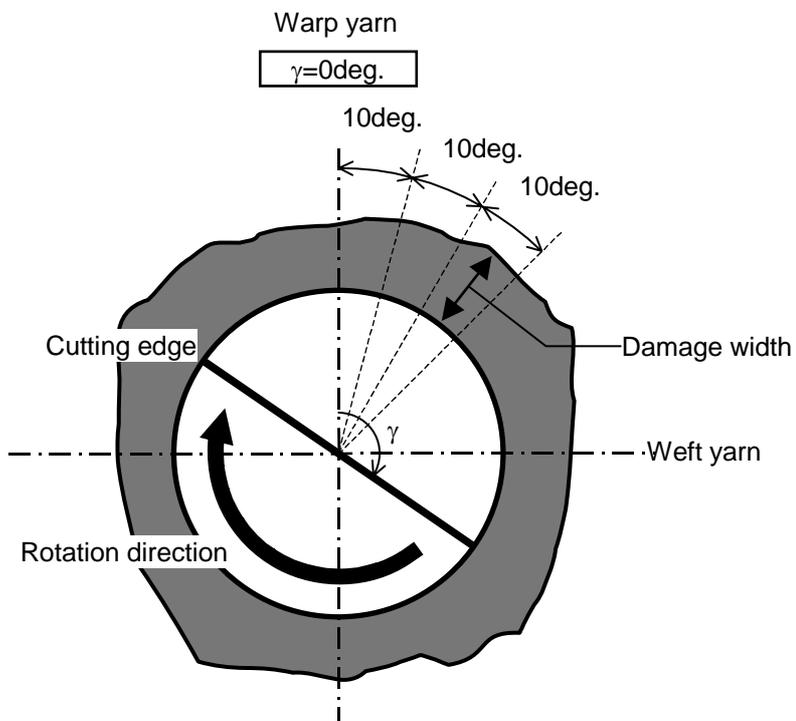


Fig.2-9 Definition of Damage width.

6(a)中のA部)の輝度値は加工穴画像入力時の光源の強さ(輝度値)により多少変化するが、その部分のほとんどが輝度値60~80になっているため、2値化処理後には損傷部全体が輝度値0(黒)に変換される。また、損傷を受けてない箇所(Fig.2-6(a)中のB部)の輝度値は160~200であるため、2値化処理後には輝度値255(白)に変換される。したがって、2値化処理のしきい値を128に設定することで安全に損傷部分のみを抽出可能となり、2値化処理後に輝度値0(黒)に変換される箇所を本研究では内部損傷と定義している。ただし、内部損傷部の輝度値は場所により異なり、特に2値化処理前の損傷を受けた部分と受けて無い部分の境目の輝度値は128以上になる箇所があり、しきい値を輝度値128に設定した場合、2値化処理後に輝度値255(白)に変換される。しかし、その境目の部分は1~2画素分であり、1画素当たり3 $\mu$ mであることから、画像処理による内部損傷の測定誤差は最大でも6 $\mu$ mとなる。したがって、2値化処理のしきい値を輝度値128に設定することにより、内部損傷のほぼ全体が抽出されることになる。また、2値化処理のしきい値を輝度値128に設定することで、画像処理による内部損傷の絶対値と超音波顕微鏡で観察したときの絶対値はほぼ一致しており、信頼の高い評価方法であることが言える。

次に、得られた2値化画像を加工穴と損傷部分の外形状に分け、それぞれの座標値を求めた。Fig.2-7は加工穴の中心座標及び損傷外形状を求める方法を詳細に示したものである。分離した加工穴形状の座標値から加工穴中心座標及び加工穴半径を以下の方法で算出した。

m個の加工穴形状[Fig.2-7(a)]の座標データ $(x_k, y_k)$ ,  $(k=1-m)$ に最適な円の方程式を

$$x^2+y^2+ax+by+c=0$$

とすると、最小二乗法により、

$$\begin{pmatrix} \sum x_k^2 & \sum x_k y_k & \sum x_k \\ \sum x_k y_k & \sum y_k^2 & \sum y_k \\ \sum x_k & \sum y_k & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum (-x_k^2 - x_k y_k^2) \\ \sum (-x_k^2 y_k - y_k^2) \\ \sum (-x_k^2 - y_k^2) \end{pmatrix}$$

で表される<sup>[191]</sup>ため、この式のa,b,cを求め、円の方程式に代入して加工穴中心座標値を求め[Fig.2-7(b)]、加工穴中心が座標原点となるようにすべてのデータを変換した。

FRPの穴あけ加工では加工穴の円筒内面の位置によって、損傷形態が異なるため、強化材であるガラスクロスに対する加工穴壁面の位置を定義するためにFig.2-8に示すように、ドリル回転方向を正としたときの角度を回転角( $\gamma$  deg.)とした。また、ドリル加工は回転切削のため常に切削方向と繊維とのなす角が変化している。そのため、切れ刃の切削方向と単繊維とのなす角がFRPの切削において重要であると言える。そこで、ドリル切れ刃の進行方向と単繊維のなす角を繊維角と定義し、横糸方向及び縦糸方向に

ついてそれぞれ繊維角( $\theta/\theta+90\text{deg.}$ )を定義した。例えば、回転角 $\gamma=30\text{deg.}$ の箇所では、繊維角 $\theta=30\text{deg.}$ (横系方向)と $\theta=150\text{deg.}$ (縦系方向)の2つの方向の繊維が存在することになる。その後、Fig.2-9に示すように、回転角を $10\text{deg.}$ 毎に区切りその範囲内での加工穴半径の平均値[Fig.2-7(c)]と、加工穴外形状より求めた中心位置座標[Fig.2-7(b)]から損傷外形状までの最大長さ[Fig.2-7(d)]を算出し、その差を損傷幅と定義した。加工穴半径は $10\text{deg.}$ 毎に求めているため、範囲によって異なる値となる。これにより損傷幅は高い精度で測定可能であると考えられる。

加工穴の画像取り込みから損傷幅の算出までの作業時間は1穴あたり約60sであり、多数の加工穴を定量的、統計的かつ迅速に処理可能であることが本画像処理システムの特徴である。

## 2-3 実験結果及び考察

### 2-3-1 内部損傷の異方性

Fig.2-10は同じ加工条件で穴あけ加工したときの一層材の光透過顕微鏡写真を示したものである。Fig.2-10(a)より、A、B、C部の3ヶ所で黒色の損傷部が観察され、特にC部で損傷が大きく発生しているのが分かる。Fig.2-10(b)より、D、E部の2箇所損傷が発生しているのが観察される。Fig.2-10(c)よりF、G、H、I部の4ヶ所で損傷が発生し、特にF部で大きく損傷が発生しているのが観察される。Fig.2-10(d)より、J、K、L部の3ヶ所で損傷が発生しているのが分かる。また、すべての加工穴の損傷部は加工穴周辺に沿って均一に発生するのではなく、大小様々ではあるが局所的に発生しており、内部損傷は異方性のある発生形態であることが観察できる。Fig.2-10(a)のC部及びFig.2-10(c)のF部の損傷は他の損傷部と比較して大きく発生しており、加工穴品質が悪化していることが分かる。また、Fig.2-10(b)及びFig.2-10(d)は損傷が発生しているが、その領域は小さくFig.2-10(a)、(c)に比べ加工穴品質が高いことが言える。このように、クロス材の穴あけ加工では同じ加工条件でも内部損傷の発生形態に大きく差があることが特徴であり、内部損傷の評価には統計的手法を使用する必要があると考えられる。

縦系と横系の内部損傷の影響を見るために、加工穴を2分割(回転角 $\gamma:0\sim 180\text{deg.}$ )したときの50サンプルの損傷幅と回転角の関係をFig.2-11に示す。2-2-2項でも説明したように、損傷幅は回転角を $10\text{deg.}$ 毎に区切りその範囲内での加工穴中心から損傷外形状までの最大長さと加工穴半径の平均値との差としている。Fig.2-11で、損傷幅のプロットは、例えば、回転角 $20\text{deg.}\sim 30\text{deg.}$ の範囲の損傷幅は回転角 $25\text{deg.}$ のラインにプロットしている。Fig.2-11より、各サンプルの損傷幅は回転角に対して規則性が見にくい。そこで、Fig.2-11のサンプルの中から任意に3つのサンプルを選び、それらの損傷

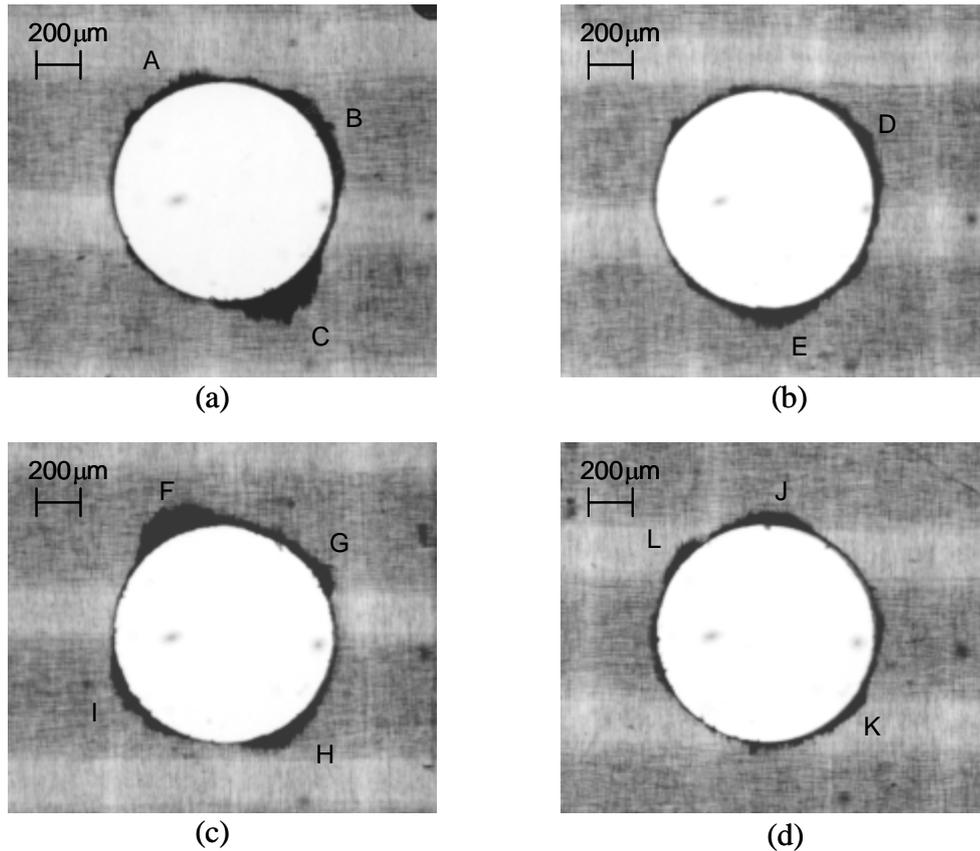


Fig.2-10 Micrographs of drilled lamina ( $V=15.8\text{m/min}$ ,  $f=63\mu\text{m/rev}$ ).

幅と回転角の関係を Fig.2-12(a) ~ (c) に示す . Fig.2-12(a) のサンプル1 では , 回転角  $70\text{deg.} \sim 90\text{deg.}$  ,  $160\text{deg.} \sim 180\text{deg.}$  付近で損傷幅が他の回転角のものよりも増大しており , 回転角  $20\text{deg.}$  及び  $110\text{deg.}$  付近で極小値をとる . Fig.2-12(b) のサンプル2 では , 回転角  $45\text{deg.} \sim 60\text{deg.}$  ,  $100\text{deg.} \sim 120\text{deg.}$  付近で損傷幅は他の回転角に比べ増大しており , 回転角  $45\text{deg.} \sim 60\text{deg.}$  での極大値と回転角  $100\text{deg.} \sim 120\text{deg.}$  での極大値は異なる値を示している . また , 損傷幅は回転角  $90\text{deg.}$  付近で極小値をとる . Fig.2-12(c) のサンプル3 では , 回転角  $45\text{deg.} \sim 60\text{deg.}$  ,  $150\text{deg.} \sim 170\text{deg.}$  付近で損傷幅は他の回転角のものより増大しており , 回転角  $20\text{deg.}$  及び  $110\text{deg.}$  付近で極小値をとる . Fig.2-12(a) ~ (c) を比較すると , それぞれの損傷幅の発生形態は大きく異なり , 回転角  $0\text{deg.} \sim 180\text{deg.}$  の範囲で , 異なる損傷幅 , すなわち異方性を有する損傷幅が発生し , 2つの極大値をもつことが観察される . その極大値の発生する回転角はサンプルごとに異なり , 極小値をとる回転角もサンプルによって異なっている . 極大値と極小値との差は Fig.2-12(a) では約  $60\mu\text{m}$  , Fig.2-12(b) では約  $80\mu\text{m}$  , Fig.2-12(c) では約  $40\mu\text{m}$  となっており , サンプルにより異なる値を示している . したがって , GFRP はガラス繊維とエポキシ樹脂

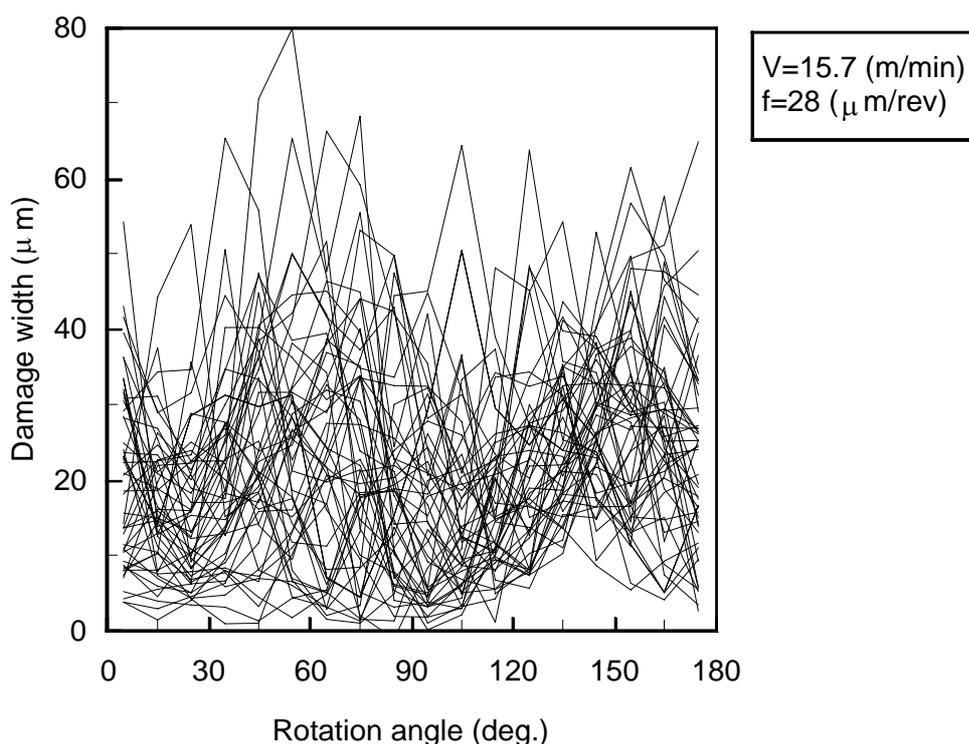


Fig.2-11 Relation between damage width and rotation angle.

という異なる材料から構成されているため、鋼等の均質材料に比べ<sup>[19]</sup>同一の切削条件で加工したサンプルの損傷幅のばらつきは非常に大きいことが分かる。また、回転角0deg. ~ 180deg. の範囲で2つの極大値をもち、異方性を有することが特徴と言える。よって、GFRPの損傷幅の傾向を調査するためには、統計的な手法を使用する必要がある。そこで、Fig.2-11の損傷幅のサンプルの平均値を算出する。

### 2-3-2 内部損傷の統計的処理

Fig.2-13(a) ~ (e)はそれぞれFig.2-11の損傷幅のサンプルを10, 20, 30, 40, 50個取り出し平均値を算出したときの損傷幅と回転角の関係を示したものである。Fig.2-13(a)の10サンプルの損傷幅の平均値は、回転角0deg. から回転角30deg. 付近まで減少し、回転角30deg. から増加して回転角90deg. 付近で極大値をとる。回転角90deg. 付近から回転角120deg. 付近まで減少し、回転角120deg. で極小値をとる。また、回転角120deg. より回転角170deg. 付近まで増加し、回転角170deg. で極大値をとり、回転角170deg. 以降は減少する。したがって、10サンプルの損傷幅の平均値は回転角0deg. ~ 180deg. の範囲で、2つの極大値及び極小値が存在していることがわかる。Fig.2-13(b)の20サンプルの損傷幅の平均値はFig.2-13(a)の10サンプルの損傷幅の平均値とほぼ同様な傾向

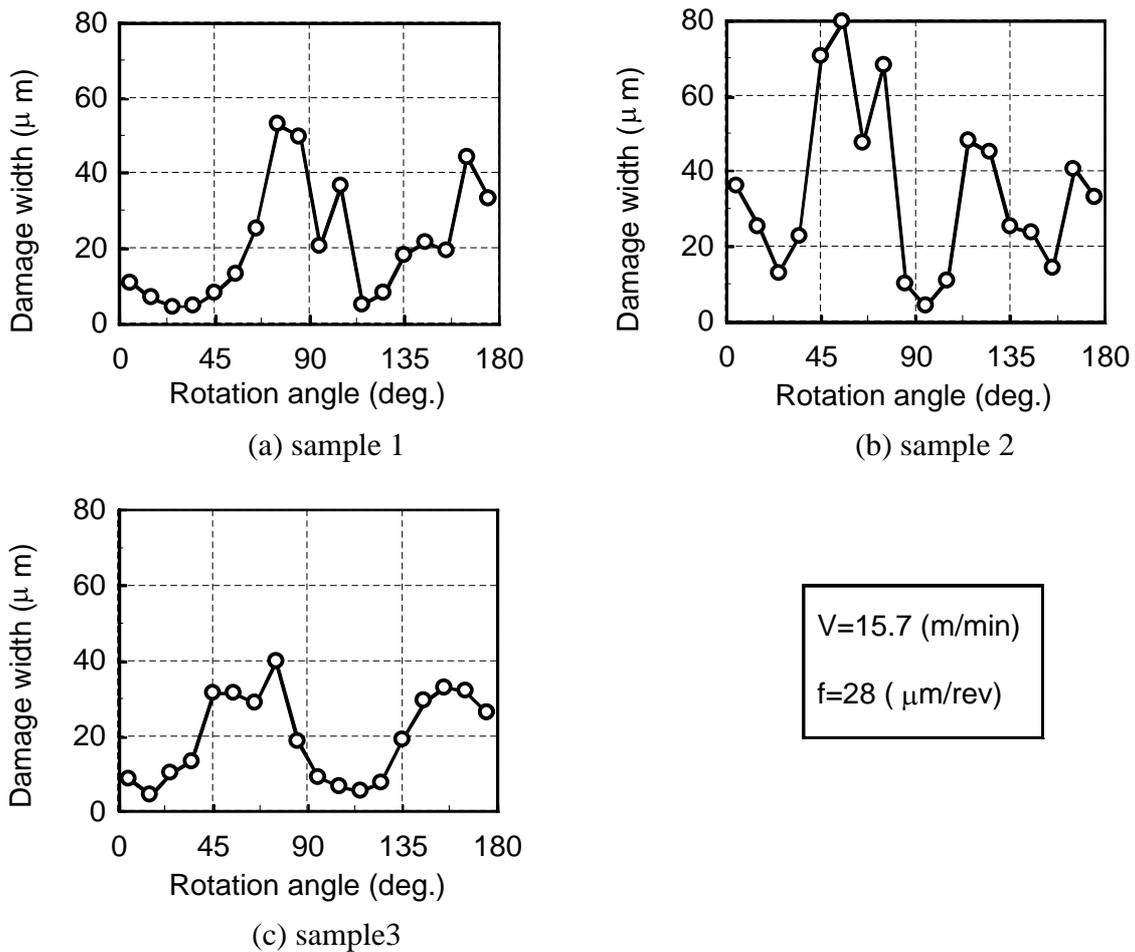


Fig.2-12 Relation between damage width and rotation angle.

を示している。しかし、極大値の発生する回転角がわずかに異なり、また回転角 90deg. 付近の損傷幅の平均値の極大値に注目すると、Fig.2-13(a)では約27μm、Fig.2-13(b)では約24μmとなり損傷幅の平均値は多少の違いが見られる。Fig.2-13(c)の30サンプルの損傷幅の平均値は回転角 0deg. から減少し回転角 30deg. 付近で極小値となる。回転角 30deg. 付近から増加し回転角 70deg. 付近で極大値をとり、回転角 120deg. 付近で極小値をとる。回転角 120deg. から増加し始め回転角 170deg. 付近で極大値となりその後減少する。30サンプルの損傷幅の平均値は、回転角 0deg. ~ 180deg. の範囲で2つの極大値及び極小値が存在しており、Fig.2-13(a)、(b)と同じような傾向であるが、わずかではあるが極大値及び極小値が異なる。Fig.2-13(d)の40サンプルの損傷幅の平均値は回転角 0 ~ 180deg. の範囲で2つの極小値及び極大値が存在しており、Fig.2-13(a) ~ (c)と同様な傾向を示す。しかし、Fig.2-13(c)とFig.2-13(d)を比較すると、極小値となる回転角はほぼ一致しており極小値もほぼ同じであるが、回転角 45deg. ~ 60deg. 付近の極大値

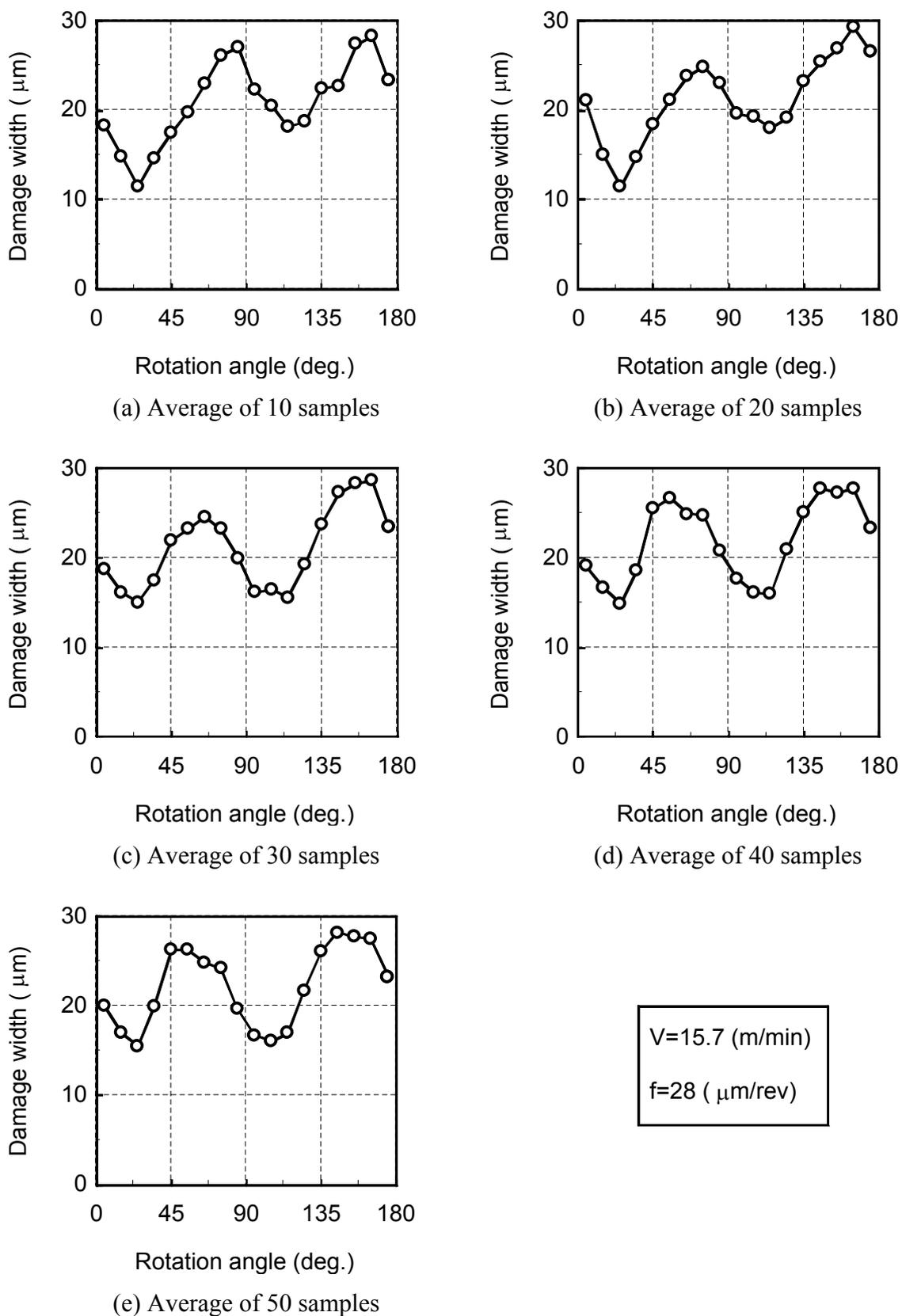


Fig.2-13 Relation between damage width and rotation angle.

はわずかに異なることが分かる。Fig.2-13(e)の50 サンプルの損傷幅の平均値は、回転角0deg. ~ 180deg. の範囲で2つの極小値及び極大値が存在しており、Fig.2-13(a) ~ (d)と同様な傾向を示す。Fig.2-13(d)とFig.2-13(e)を比較すると、極大値及び極小値が存在する回転角がほぼ一致しており、極大値及び極小値もほぼ一致している。したがって、サンプル数を40個とした損傷幅の平均値はそれ以上サンプルを増やしてもほとんど変化が見られないと考えられる。そこで、本研究では安全を考えて損傷幅のサンプル数を50個とする。Fig.2-13(e)を詳細に見ると、回転角45deg. ~ 60deg. 付近で極大値が約 $27\mu\text{m}$ 、回転角135deg. ~ 150deg. 付近で極大値が約 $28\mu\text{m}$ となり損傷幅の平均値は他の回転角のものより大きい値となり、極大値にほとんど差が見られない。したがって、損傷幅は90deg. 周期で繰り返し、縦系及び横系の影響はほとんど見られないことから加工穴を4分割して考えることができる。加工穴を2分割した場合のサンプル数は上記の理由で50個と設定しているの、加工穴を4分割して考えるとサンプル数は100個となる。

### 2-3-3 内部損傷の発生形態

Fig.2-14は透過光による加工穴の内部損傷の状態を示す。内部損傷は回転角30deg. 付近から発生し、繊維角30deg. のガラス繊維に沿って進行し、繊維に沿った損傷長さは最大となる。また、回転角30deg. 付近には、繊維角150deg. 方向の繊維も存在するが、損傷の進行は少ない。すなわち、ガラスクロス材の内部損傷は、直交する繊維で損傷の進行状態に大きな差を示している。さらに、損傷幅はこれらの結果として回転角60deg. 付近で大きくなる。

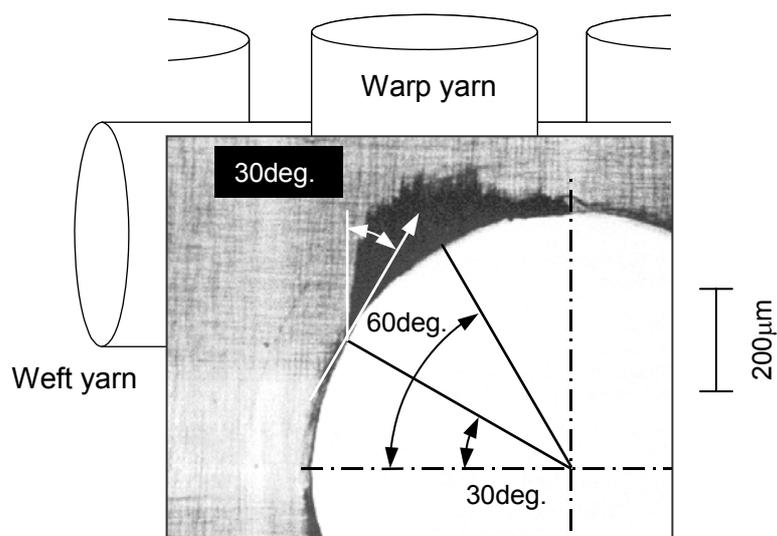
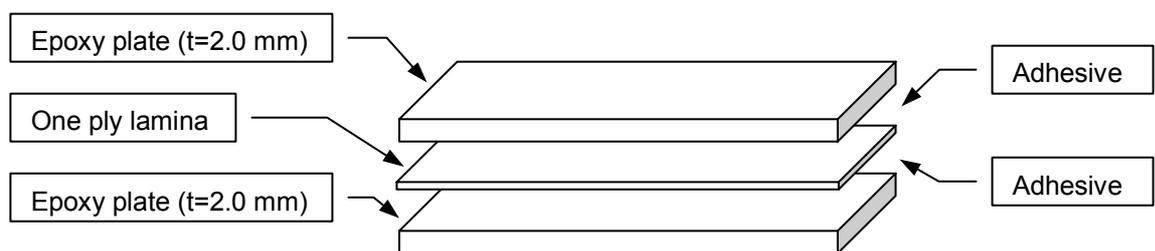


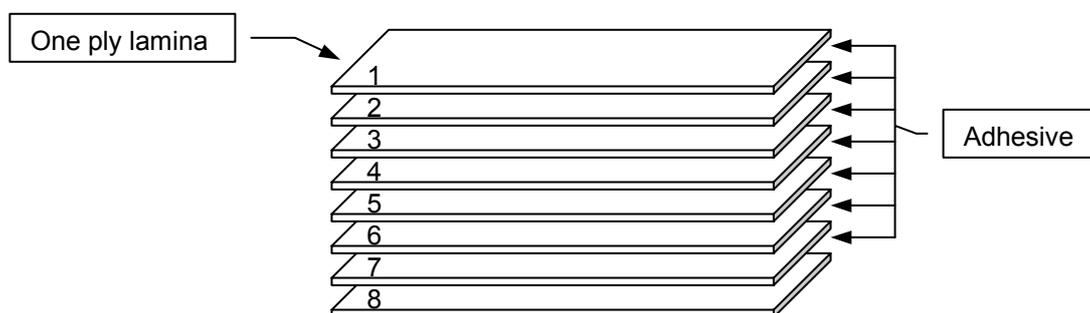
Fig.2-14 Micrograph of drilled lamina ( $V=15.7\text{m/min}$ ,  $f=63\mu\text{m/rev}$ ).

## 2-4 検証実験

前節までに、プリント基板用GFRPの小径穴あけ加工における加工穴周辺に発生する内部損傷の新しい評価方法を提案し構築した。GFRP一層材をFig.2-3 (Method A)に示すような方法で固定しドリル加工を行い、ガラス繊維とエポキシ樹脂の光透過性に注目し一層材の加工穴に光を透過させることによって加工穴周辺に発生する内部損傷が黒く写し出される性質を利用することによって内部損傷を測定及び評価した。また、積層板と一層材の内部損傷の最大値（加工穴半径と加工穴中心から損傷外形状との差の最大値）を超音波顕微鏡を使用して観察した結果、それらの値がほぼ一致することを明らかにした。しかし、内部損傷の発生形態についてはGFRP積層板の加工穴をGFRP一層材の加工穴でシミュレーション可能であるか検証されていない。Method Aのようにアルミ板と積層板の間に一層材を挟み込み固定するだけでは、ドリル加工時に発生する層間の引張力及びせん断力が十分に伝わらないことが考えられる。そこでこれらの力を考慮するために、本節ではFig.2-15に示すような方法でGFRP積層板の加工穴がGFRP一層材によりシミュレーション可能であるか検証実験を行った。Fig.2-15(a)のMethod Bは板厚2.0mm



(a) Method B



(b) Method C

Fig.2-15 Methods of verification experiment.

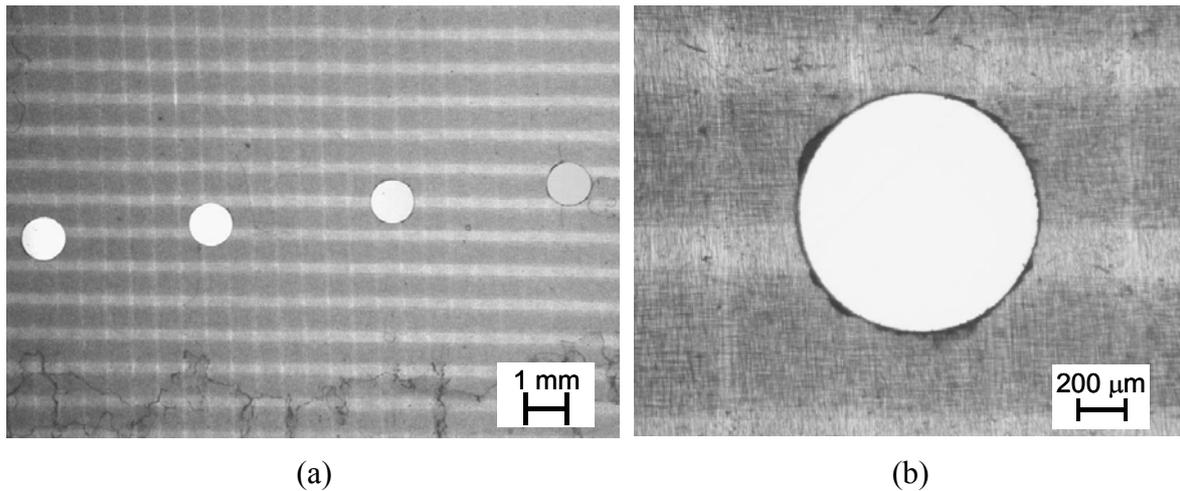
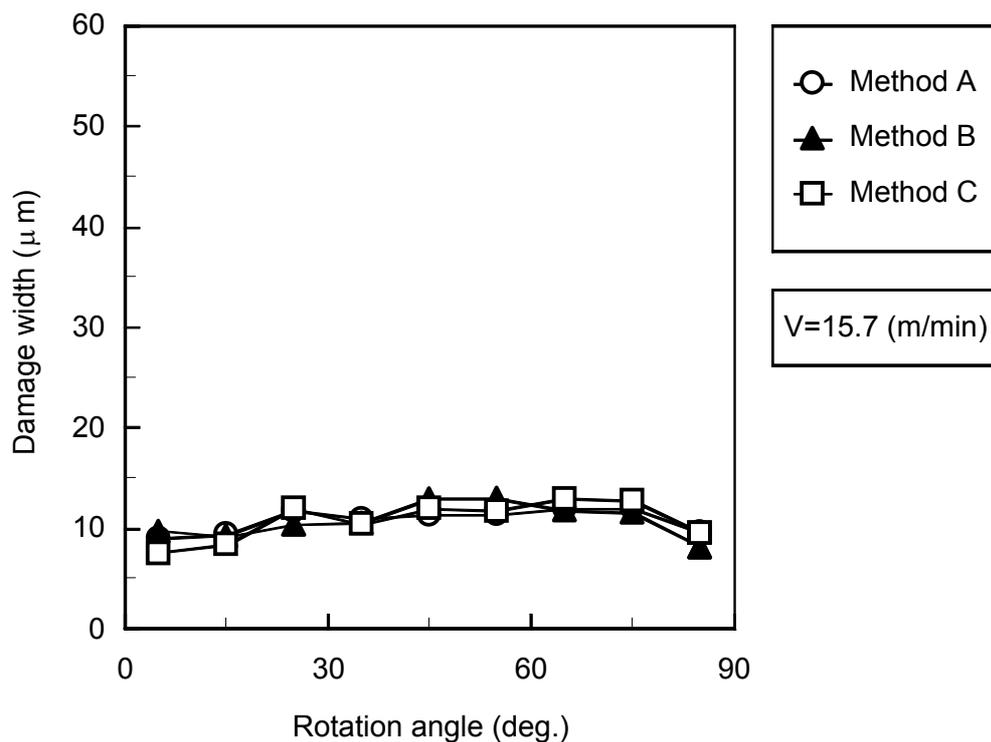


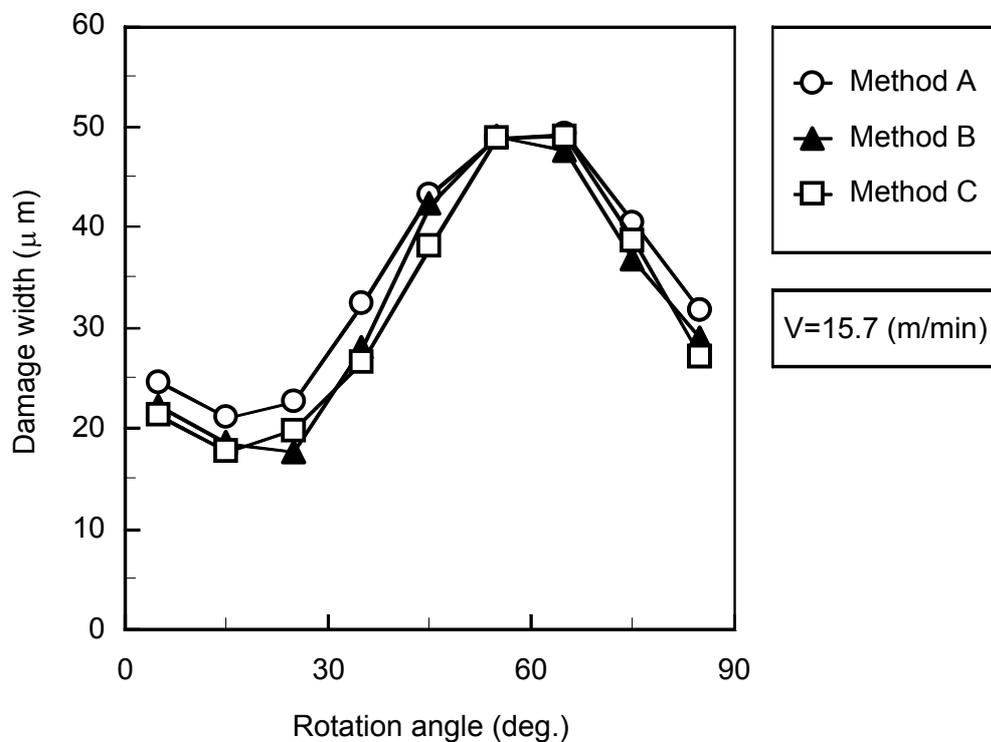
Fig.2-16 Micrographs of drilled lamina (verification experiment).

のエポキシ板の間にGFRP一層材をセメダイン社製二液混合型エポキシ樹脂系接着剤(エクスルエポ)で接着したものでドリル加工を行った。Fig.2-15(b)のMethod Cは8枚のGFRP一層材をMethod Bで使用したものと同様な接着剤で接着したものでドリル加工を行った。Method B及びMethod Cでは、上部当て板としてアルミ板を、下部当て板としてベークライトを使用した。ドリル加工後、沸騰水に被削材を5分間ほど浸け、刃の薄いカッターにより接着面をゆっくり剥し、GFRP一層材を単体にしてから損傷幅を測定した。Method CについてはFig.2-15(b)中の4層目のGFRP一層材の加工穴の損傷幅を測定した。Fig.2-16はMethod Cの検証実験後、接着面を刃の薄いカッターにて剥がした際の顕微鏡写真である。Fig.2-16(a)より、接着剤はきれいに剥がれていることが観察される。また、Fig.2-16(b)の拡大顕微鏡写真から接着剤が残っている箇所は見当たらず、十分に評価可能な画像である。

Fig.2-17はMethod A, Method B, Method Cによる方法でドリル加工を行った時の損傷幅と回転角の関係を示したものである。Fig.2-17(a)の送り量が小さい場合、Method Aの損傷幅は回転角によらず約10 $\mu$ m前後となりほぼ均一に発生している。Method B Method Cの損傷幅についても同様な結果となった。Fig.2-17(b)より、送り量が大きい場合、Method Aの損傷幅は回転角0～30deg.で約20 $\mu$ m前後となり、回転角45deg.付近から損傷幅は増大し回転角60deg.付近で極大値約50 $\mu$ m、回転角65deg.以降では減少し、異方性のある発生形態であることが分かる。Method B及びMethod Cについても損傷幅の発生形態は同様な傾向となった。したがって、送り量によらずMethod Aの損傷幅はMethod B及びMethod Cとほぼ同様な結果となり、GFRP積層板の内部損傷はMethod Aでドリル加工を行うことにより、GFRP一層材で再現可能であることが分かった。



(a)  $f=5 \text{ } (\mu\text{m/rev})$



(b)  $f=63 \text{ } (\mu\text{m/rev})$

Fig.2-17 Relation between damage width and rotation angle.

## 2-5 結 言

ガラス繊維とエポキシ樹脂の光透過性を利用してGFRPの小径ドリル加工における加工穴の内部損傷の評価に画像処理システムを提案し構築した。本システムを利用し内部損傷を評価した結果を以下に示す。

- (1) 内部損傷の評価に画像処理を適用することは、多数のブランクの損傷を迅速に評価可能であり、ドリル加工時の加工穴の内部損傷の評価に有効である。また、加工穴壁面での位置を定義するために回転角、ドリル切れ刃と繊維方向の関係を繊維角及び内部損傷の大きさを損傷幅とすることで内部損傷の発生形態が高い精度で測定できることを示した。
- (2) 内部損傷の発生形態はサンプルによって非常にばらつくことが分かった。しかし50個のサンプルを平均すると、内部損傷の発生形態に傾向が見られ、加工穴を4分割することで評価できることが分かった。
- (3) 内部損傷は回転角 30deg. 付近から繊維角 30deg. のガラス繊維に沿って進行する。回転角 30deg. 付近には繊維角 150deg. 方向の繊維も存在しているが、損傷の進行は少ない。したがって、ガラスクロス内部の損傷は直交する2つの繊維で損傷の進行状態に大きな差が生じる。また、損傷幅は回転角 45 ~ 60deg. 付近で最大となることが分かった。
- (4) 検証実験を行った結果、積層板に発生する内部損傷を一層材で再現可能であることを示し、本研究で提案した GFRP の内部損傷の評価方法の有効性を証明した。

## 第3章

### 表面損傷と切削抵抗の特徴<sup>[2],[3],[12]</sup>

前章では、GFRPスルーホール加工穴の内部損傷に画像処理を適用することによる新しい評価システムについて述べた。GFRPスルーホールドリル加工では内部損傷だけでなく表面損傷も発生する。表面損傷では主に加工穴壁面にガラス繊維の掘り起しが発生し、この損傷により次工程のメッキ加工で不連続メッキやメッキ密着性が低下するなど、内部損傷同様にプリント基板の回路接続性を著しく低下させる。そこで本章では、加工穴品質として表面損傷を取り上げ、表面損傷の発生メカニズムを解明し、発生要因について説明する。

#### 3-1 緒言

前章では、ガラス繊維とエポキシ樹脂の光透過性に注目して、GFRPの内部損傷の評価に画像処理を利用することにより新しい評価手法を構築及び確立した。この評価方法によりGFRPの内部損傷を迅速かつ定量的に測定可能であることを示した。緒論でも述べたように、GFRPは全く性質の異なるガラス繊維とエポキシ樹脂から構成されるためドリル加工を施すと、ガラス繊維の縦糸と横糸の切削状態に差が生じるため加工壁面にガラス繊維の掘り起しが発生し表面粗さが著しく悪化する。ドリル加工の次工程であるメッキ加工で、粗さが悪化した表面にメッキを施すと不連続メッキやメッキ密着性の低下などの問題が生じ、これらの不良で電子・電気機器の故障につながり、プリント基板の信頼性を著しく劣化させるため、損傷発生メカニズムを解明する必要がある。

ガラスクロス基材は複合材構造で、高強度のガラス繊維に方向性があるため、均質材料である鋼材等のドリル加工の加工面<sup>[19]</sup>と異なり、加工穴壁面でガラス繊維の掘り起し現象が発生する。ガラス繊維の掘り起しは加工穴円筒内面の位置によって発生の有無があり<sup>[162]</sup>、加工穴壁面の表面粗さが悪化し、穴あけ加工後のメッキ工程でメッキ膜の不連続やメッキ密着性の低下等の不具合を誘発させる可能性がある<sup>[60],[170]</sup>。そのため、表面粗さの増大は加工穴品質に悪影響を及ぼす。FRPの表面粗さに関しての研究では、王ら

は切削方向と繊維方向に着目し、2次元切削により切削条件と仕上げ面生成のメカニズムを明らかにしている。C.W.Wernら<sup>[142]</sup>はFRPのドリル加工穴の軸方向に表面粗さを測定し、最大表面粗さと平均表面粗さ等と加工条件との関係を示している。しかし、いずれの研究も加工条件を変化させて切削抵抗と表面粗さへの相関などを調査しておらず詳細な基礎的データが不足していると考えられる。

そこで本章では、プリント基板用GFRPの小径ドリル加工時の加工穴の損傷状態を評価するために加工穴壁面の表面粗さに着目し、切削条件と表面粗さとの関係を調べた。まず、加工穴壁面のSEM写真を観察し穴壁面での位置による損傷状態を調べる。さらに、GFRPの加工メカニズムを検討するために切削条件を変化させて、加工時の切削抵抗を測定し、その形態から静的成分と動的成分に分けて評価することにより、切削抵抗と表面粗さとの関係を考察した。また、ドリルの切れ刃及びチゼル部の表面粗さに及ぼす影響を調査するために下穴実験も行った。

### 3-2 実験装置及び方法

実験に使用した被削材は、ガラスクロス基材エポキシ樹脂板で最も多用されているJIS-GE4Fとした。ガラスクロスは7628( IPC-EG-140の規格名称)で、ガラス繊維はEガラスを使用している。板厚1.6mm(ガラスクロス積層数8層)の積層板と板厚0.2mm(ガラスクロス積層数1層)の一層材を用いた。Table 2-1にEガラスの諸特性を、Table2-2にガラスクロスの諸特性を、Table2-3にエポキシの諸特性を示す。

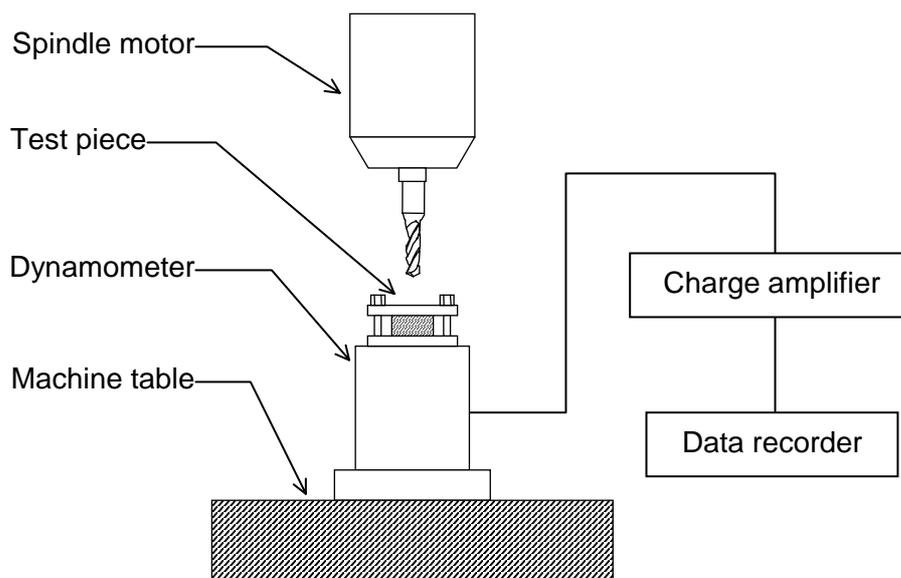


Fig.3-1 Measuring method of cutting force.

穴あけは遠州工業社製立フライス盤 (TYPE ENSHU-V1) の主軸に日本精密工作社製のハイスピンドルモーター (HS-220) を取り付けてドリル加工を行った。工具はMMC コベルコツール社製プリント基板用超硬ドリル (KUM100, 直径1mm) である。Fig.2-2 に使用したドリルの主要寸法を, Table2-4 に仕様を示す。実験においてはFig.2-3 に示すように, 通常のプリント基板の穴あけ時と同様にドリルの振れを抑え, 入り口部のバリを防ぐために上部当て板としてアルミニウム板 (板厚0.2mm) を, ドリルの破損及び出口部のバリを防ぐために下部当て板としてベークライトを使用した。出口部で当て板無しでドリル加工を行った場合には, ドリルチゼルの推力で穴出口部の方向にガラス繊維がはく離することが知られているが, 本加工では十分な当て板で保持することで, このようにはく離を防止してある点が特徴である。また, 一層材は上部当て板と積層板の間に挟んで同時に加工した。これにより, 積層板と一層材の切削状態は一致している。Table2-5 に切削条件を示す。また, 穴あけ実験は乾式加工で行い, 加工回数の増加から工具摩耗によるデータへの影響を低減するために, 工具は2~3回のならし加工を行った後に使用し, 加工回数は50回を上限とした。

切削抵抗はドリル送り方向の力であるスラスト力に着目し, このスラスト力を測定した。測定方法はFig. 3-1 に示すように, キスラー社製圧電方動力計 (TYPE 9373) の上部に取り付けた被削材をドリル加工し, 動力計により得られる信号を同社製チャージアンプ (TYPE 439) を介してティアック社製データレコーダ (XR-7000) に取り込み測定した。スラスト力のデータ処理には小野測器社製のFFT (Fast Fourier Transform) アナライザー (CF-350) を使用した。

加工穴の断面の観察には, 日本電子社製走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning Electron Microscope) JSM6400 を使用した。

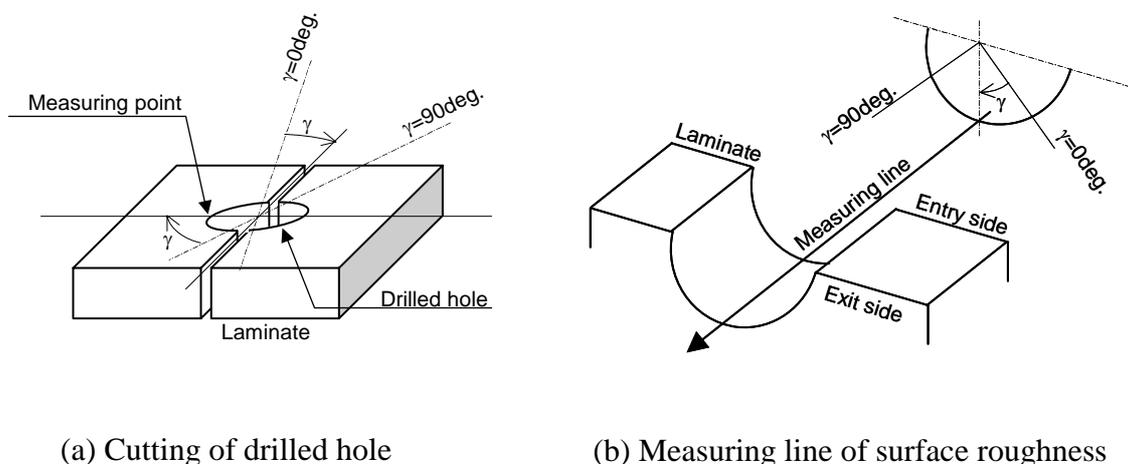


Fig.3-2 Measuring method of surface roughness.

加工穴の仕上げ面の測定には触針式の小坂研究所社製のサーフテスター（SE-30C型）を使用し，加工穴入り口部から出口部方向すなわちドリル送り方向に測定した．Fig.3-2に加工穴の表面粗さの測定方法を示す．まず，Fig.3-2(a)のように，表面粗さを測定する箇所の回転角 $\gamma$ に対して垂直に加工穴を切断する．切断機の cutter の厚さは約1mmであるので，切断時に加工穴の半分は除去される．次にFig.3-2(b)に示すように，切断した加工穴の回転角 $\gamma$ の壁面に沿って入口部から出口部（1.6mm）までの表面粗さを測定し，粗さの最大値  $R_{max}$ （peak to peak）を求めた．

### 3-3 実験結果及び考察

#### 3-3-1 回転角と表面粗さ

Fig.3-3に加工穴のドリル送り方向の表面粗さを回転角ごとに測定した結果を示す．Fig.3-3より送り量  $16\mu\text{m}/\text{rev}$  の場合，回転角  $0\text{deg.}$  付近で  $R_{max}$  は約  $5\mu\text{m}$  程度で，回転角  $30\text{deg.}$  では  $R_{max}$  は約  $15\mu\text{m}$  となる．回転角  $45\text{deg.} \sim 115\text{deg.}$  での  $R_{max}$  は  $5\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ ，回転角  $120\text{deg.}$  での  $R_{max}$  は約  $15\mu\text{m}$ ，回転角  $135\text{deg.} \sim 180\text{deg.}$  での  $R_{max}$  は  $5\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$  となる．したがって，表面粗さ  $R_{max}$  は2箇所（回転角  $\gamma=30\text{deg.}$ ， $120\text{deg.}$  付近）で悪くなりどちらの回転角の  $R_{max}$  もほとんど同じ値を示している．また，回転角においても0～

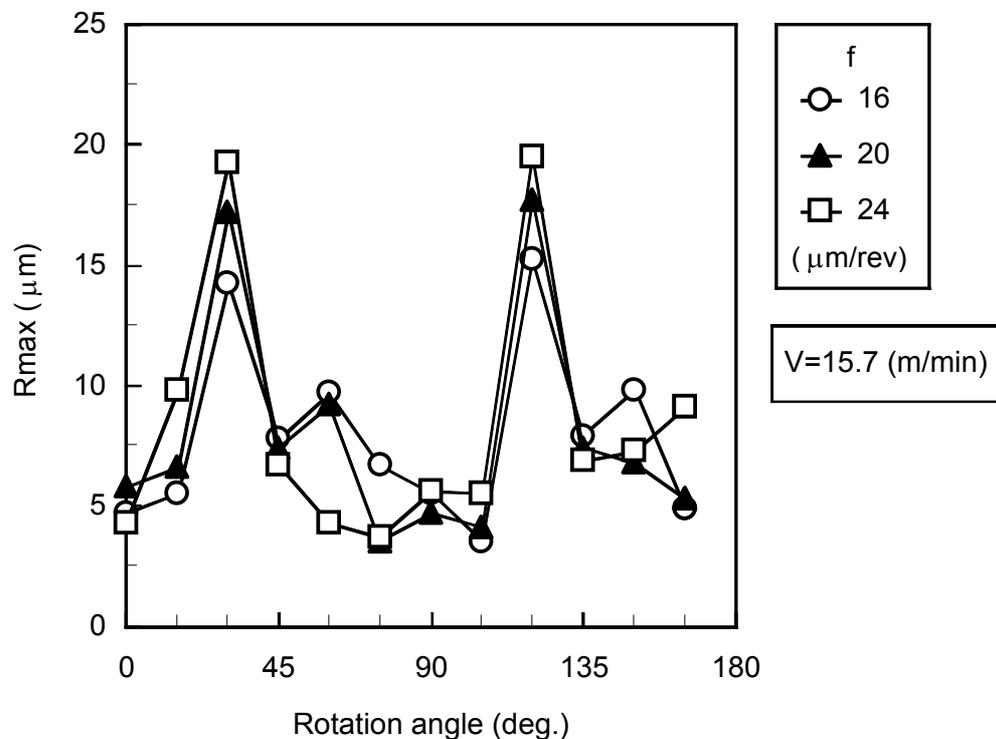


Fig.3-3 Relation between  $R_{max}$  and rotation angle.

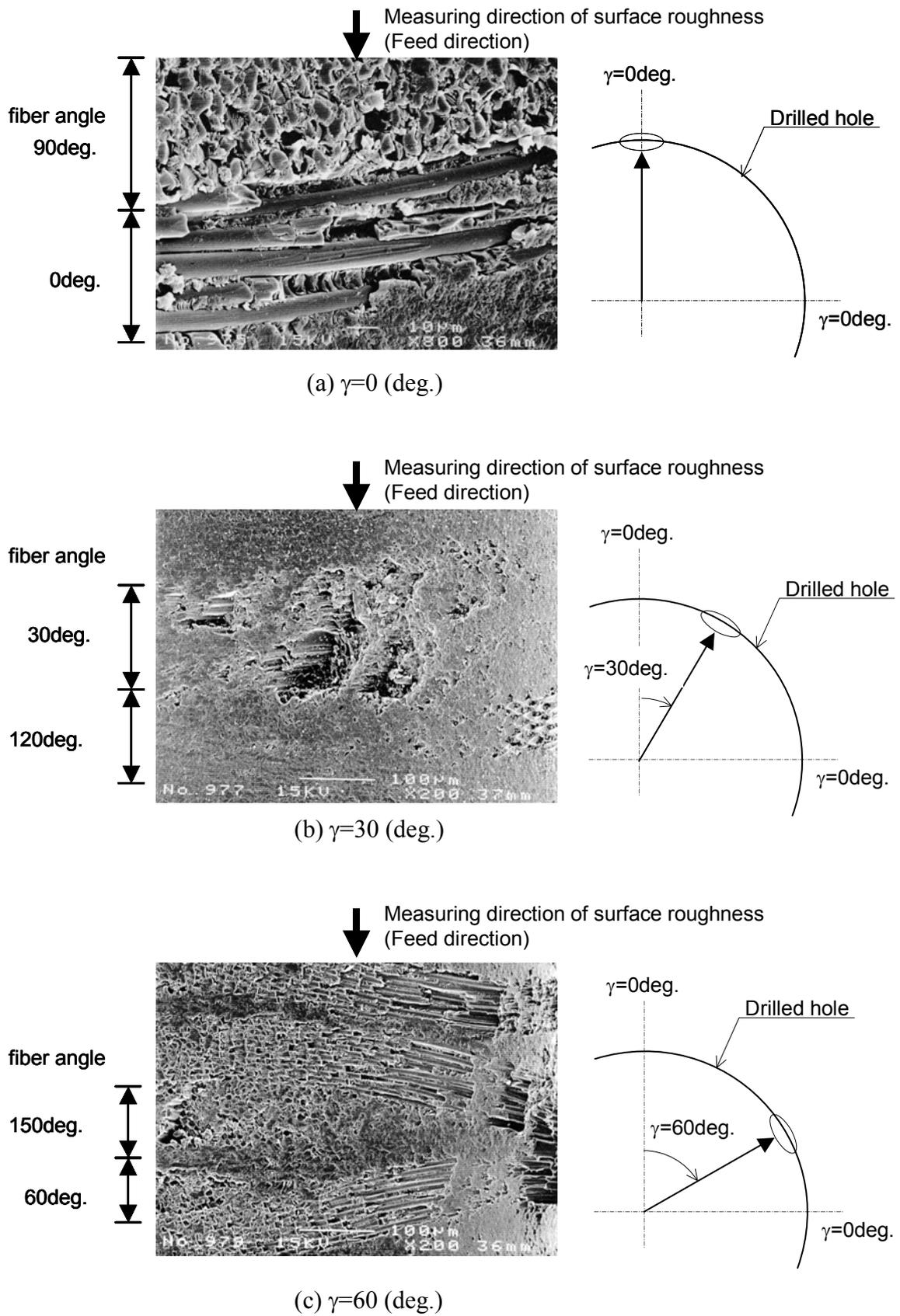


Fig.3-4 SEM micrographs of drilled hole wall ( $V=15.7\text{m/min}$ ,  $f=20\mu\text{m/rev}$ ).

90deg. と90 ~ 180deg. で分割した場合、表面粗さはほとんど同じ変化を示し、表面粗さにはガラス布の縦糸と横糸の違いによる影響がみられなく、どの送り量でも同じような傾向を示していることがわかる。そこで、加工穴を4分割して回転角0 ~ 90deg. の範囲で考える。

Fig.3-4(a) ~ (c)は、回転角0deg. , 30deg. , 60deg. 付近の加工穴表面のSEM写真を示す。Fig.3-4(a)より、繊維角90deg. の繊維はきれいに切削されているが、繊維角0deg. の繊維は切れ刃の押し付けで繊維が折られて切削されていることが分かる。しかし、繊維角0/90deg. のそれぞれの繊維方向の違いによる段差は見られず表面粗さは良好である。Fig.3-4(b)より、繊維角120deg. の繊維は掘り起こされずにきれいに切削されているが、繊維角30deg. の繊維は掘り起こされている。したがって、繊維角30/150deg. の掘り起こしの有無による段差によって表面粗さは悪化していることが分かる。Fig.3-4(c)より回転角30deg. の掘り起こしが大きいと回転角60deg. まで掘り起こされている層もあり、回転角0deg. に比べて表面は悪化している。すなわち、クロス材のドリル加工では加工表面の繊維角 $\theta$ deg. 及び $\theta+90$ deg. の直交する2つの繊維の加工状態に差が生じるため、表面粗さを増大させていることが分かる。

### 3-3-2 切削条件が表面粗さに及ぼす影響

3-3-1項では、回転角と表面粗さの関係を調べ、回転角により表面粗さが変化し、直交する繊維の掘り起こしの差によって、表面粗さが悪くなることが明らかになった。本項では、切削条件がどのように表面粗さに影響するのかを検討する。

Fig.3-5は送り量を変化させたときの回転角と表面粗さの関係を示す。Fig.3-5より、送り量が大きい場合には、回転角30deg. で表面粗さが著しく悪化していることが分かる。送り量が小さい場合にも同じような傾向が見られる。この表面粗さに顕著な差が見られる回転角30deg. 付近の加工穴表面のSEM写真をFig.3-6(a), (b)に示す。Fig.3-6(a)より送り量が小さい場合、ドリル送り方向に見たとき、繊維が掘り起こされている幅(図に示す damage area)は狭く、深さも比較的浅いことが分かる。Fig.3-6(b)の送り量が大きい場合、Fig.3-6(a)に比べ掘り起こしの幅及び深さが大きくなっていることが分かる。そこで、このように表面粗さが悪くなる回転角30deg. に注目し、切削条件と表面粗さの関係を詳細に調べた。

Fig.3-7に切削速度と表面粗さの関係を、Fig.3-8に送り量と表面粗さの関係を示す。Fig.3-7より、切削速度の上昇に伴い表面粗さは緩やかに増加する傾向にあることが分かる。一方、Fig.3-8より、送り量の上昇に伴い表面粗さは著しく増大することが分かる。したがって、表面粗さは切削速度よりも送り量の影響が大きいことが分かった。

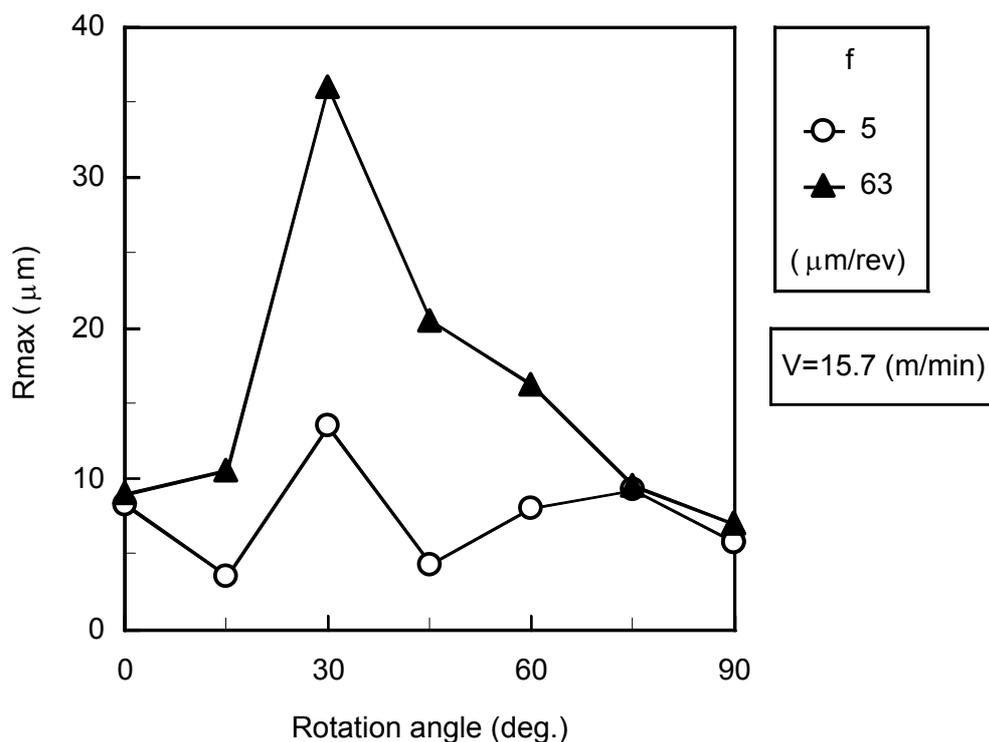


Fig.3-5 Relation between Rmax and rotation angle.

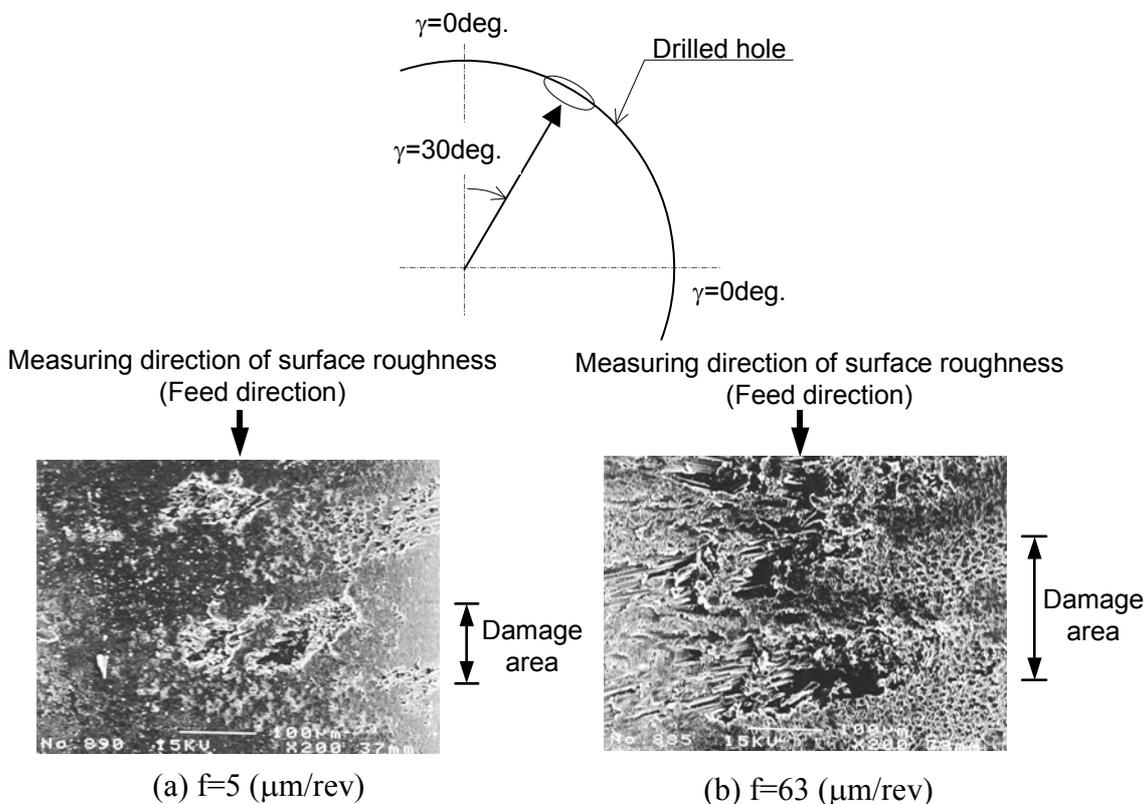


Fig.3-6 SEM micrographs of drilled hole wall ( $V=15.7\text{m/min}$ ).

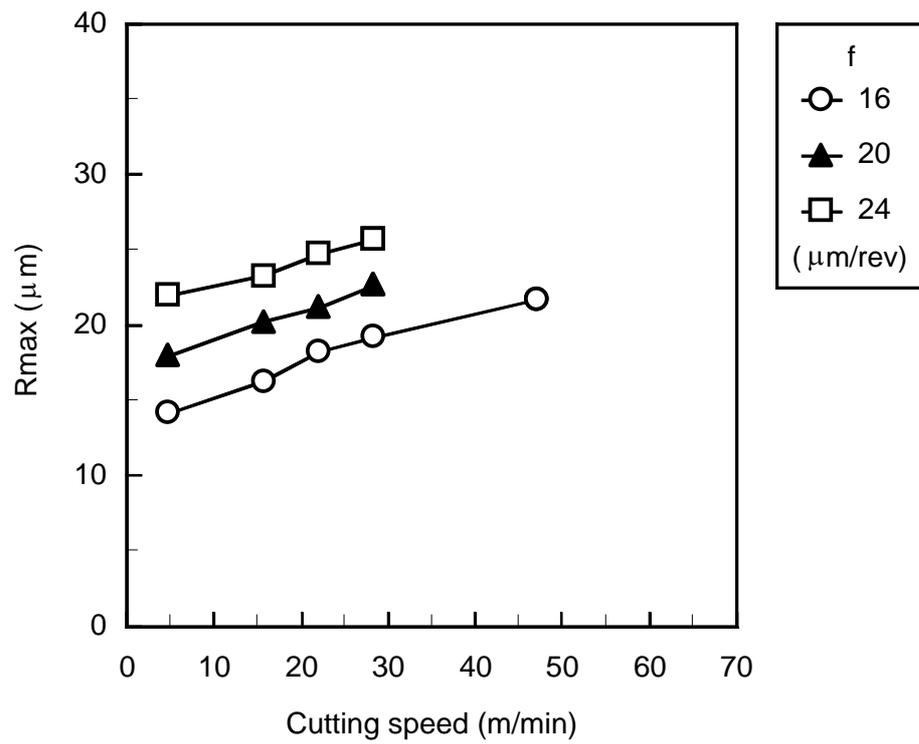


Fig.3-7 Relation between Rmax and cutting speed.

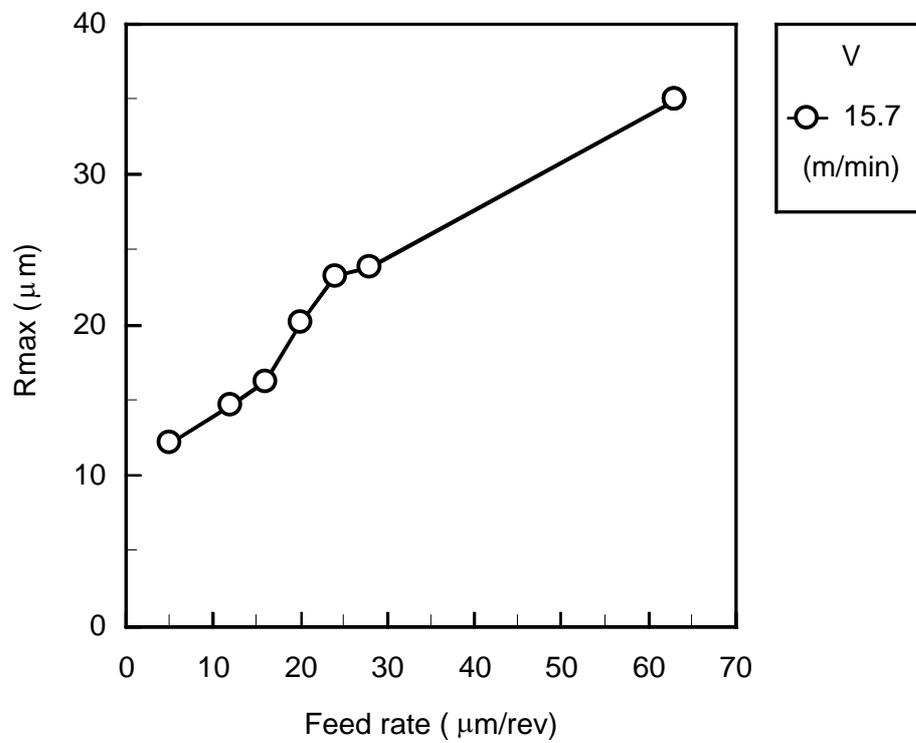


Fig.3-8 Relation between Rmax and feed rate.

### 3-3-3 加工時の切削抵抗

上述したように、表面粗さは切削速度及び送り量の上昇に伴い増加し、またその影響は切削速度よりも送り量の影響が大きく、表面粗さは繊維の切削状態の差により悪化することも判明した。加工時の切削状態の違いは、切削抵抗に現れると考えられる。そこで、ドリルによる加工時の切削抵抗の観点から表面粗さに及ぼす影響を調べる。まず、本項では、ドリル送り方向の切削抵抗であるスラスト力を調べ、その特徴を検討する。

Fig.3-9は、ドリル加工時の切削抵抗の時間波形を示す。切削抵抗を時間的に考察すると、最初に上部あて板であるアルミ板、積層板の上部銅箔、各積層のガラス布(8層)、積層板の下部銅箔の順に切削し、各部切削時に切削抵抗は極大値を示していることが分かる。このように、プリント基板は異なった種類の積層材料構成であるため切削抵抗が大きく変動し、GFRP切削部ではガラス布積層数である8層と同じ8回変動していることが分かる。そこで、このような切削抵抗を定量的にFig.3-9に示すようにGFRP部切削中の切削抵抗の平均値を静的成分(以下Fsと称す)、8個の変動部の振幅(極大値と極小値の差)を平均した動的成分(以下Fdと称す)と定義した。さらに、切削抵抗の8個の極大値、極小値をそれぞれ最大値(以下Fpと称す)、最小値(以下Fbと称す)と定義して、以下にその評価を行った。静的成分FsはFFTアナライザーを使用し、スラスト力のサンプリング時間を0.1sに設定し、周波数スペクトルを求めた際の周波数0Hzの振幅値を調べた。

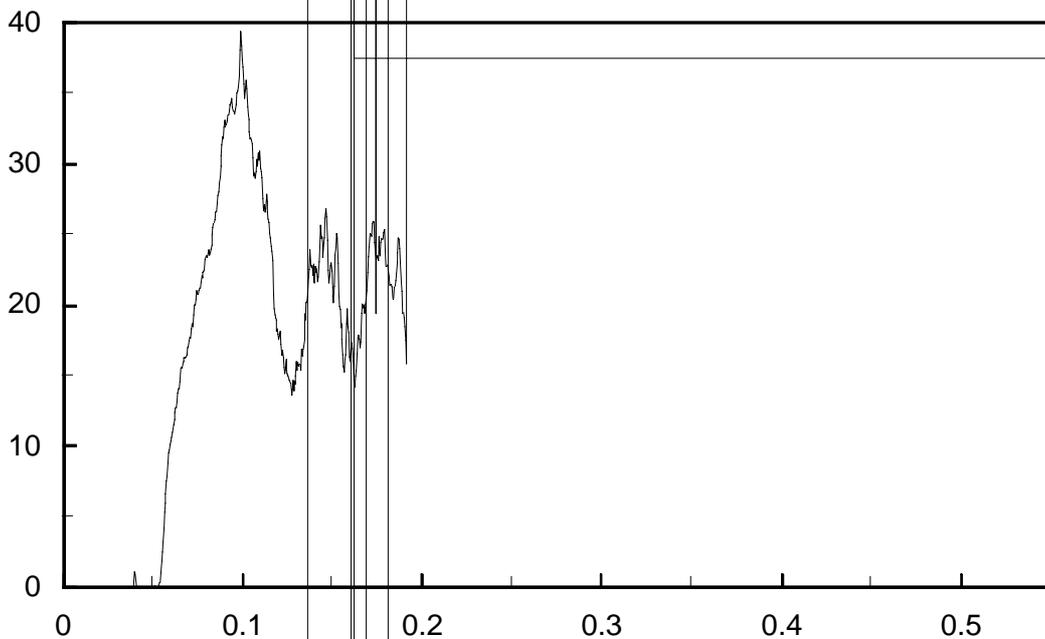


Fig.3-9 Measured cutting force (thrust).

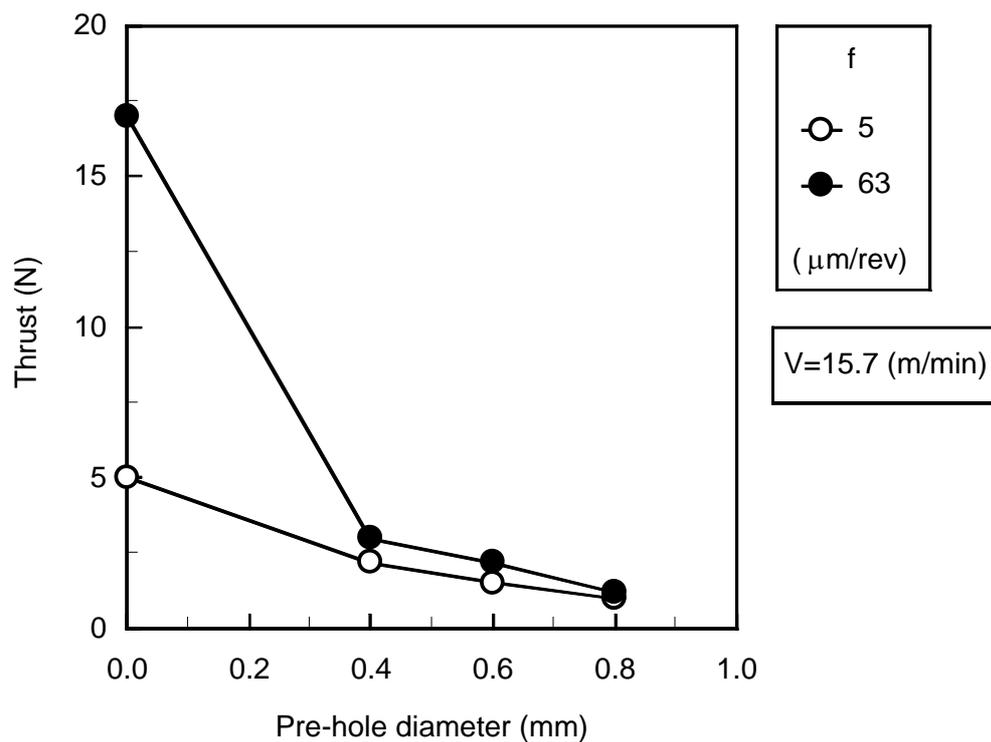
### 3-3-4 切削条件と切削抵抗

本項ではまず、3-3-3項で定義した $F_s, F_d$ のドリル半径方向分布を調べるため、加工穴の下穴を変化させて切削抵抗を測定した。Fig.3-10(a),(b)は下穴径と $F_s, F_d$ の関係を示す。まず、 $F_s$ に注目する。 $F_s$ は下穴径が減少すると増大するが、特に下穴0.4mmでは急激に増大している。本ドリルのチゼル部は直径が約0.2mmであり、チゼルによって $F_s$ が増大しているのが分かる。一方、 $F_d$ も下穴0.4mm以下で増大しているが、 $F_s$ に比べその影響が少ないことが分かる。次に、切削条件と切削抵抗の関係を調べる。

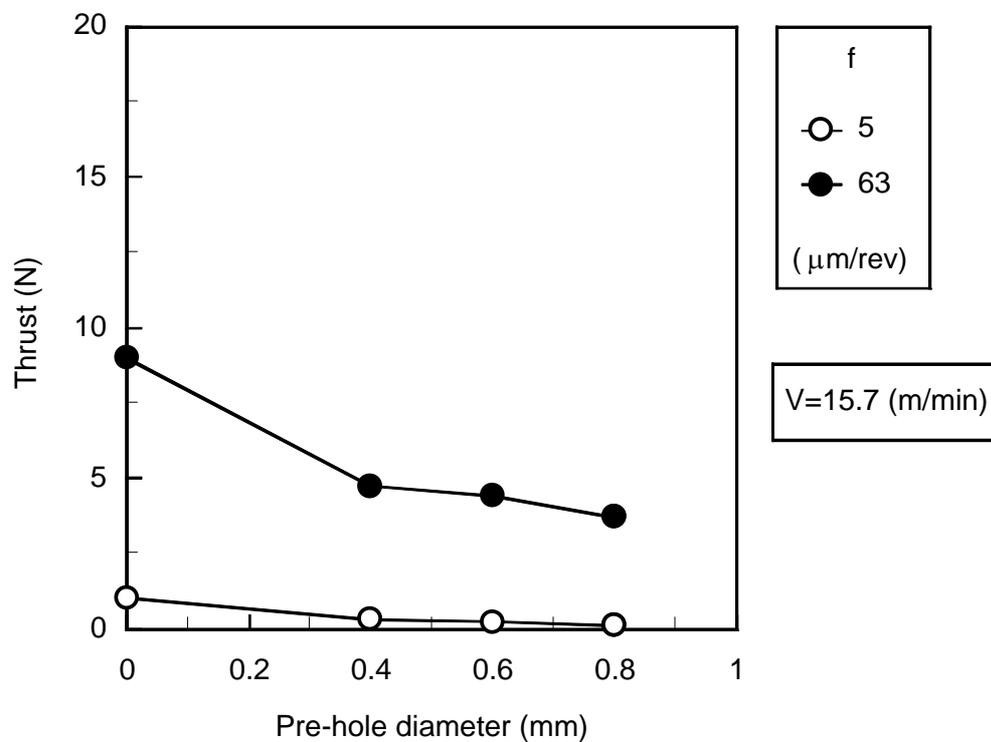
Fig.3-11(a)は、送り量を変化させたときの $F_s, F_d$ の関係を示し、Fig.3-11(b)は切削速度を変化させたときの $F_s, F_d$ の関係を示す。Fig.3-11(a)より、送り量の増加に伴い $F_s, F_d$ はいずれも増大している。一方、Fig.3-11(b)より、切削速度の上昇に伴い $F_d$ は緩やかに増加する傾向があるが、 $F_s$ は切削速度の上昇に伴いわずかに減少する傾向が見られる。このように、切削抵抗が切削条件により変化する要因を検討するために、切削抵抗を詳細に調べた。

Fig.3-12(a)に、送り量を変化させたときの $F_p, F_b$ 及びエポキシ樹脂単体を切削したときの測定結果を示す。エポキシ樹脂単体では、 $F_b, F_p$ の差はほとんどなく( $F_d$ が存在せず) $F_s$ のみであった。図より、エポキシ樹脂単体を切削した場合の切削抵抗は $F_b$ とほぼ一致しており、本資料の場合 $F_b$ はGFRP中の樹脂部の切削抵抗により決まることが分かる。一方、 $F_p$ はGFRP中の繊維の切削抵抗により決まるものと考えられる。次に、送り量と $F_p, F_b$ の関係についてみると、 $F_p, F_b$ ともに送り量の上昇に伴い増加している。また、 $F_p$ のほうが $F_b$ よりもその増加割合が大きい。このことから、 $F_p, F_b$ ともに一般の金属切削と同様に、切削面積の増加によりほぼ直線的に増加することが分かる。また、繊維の切削抵抗に対応する $F_p$ の方が樹脂の切削抵抗に対応する $F_b$ よりも比切削抵抗の大きいことも分かる。したがって、Fig.3-11(a)において、 $F_s$ が送り量の上昇により増加するのは、 $F_p$ と $F_b$ がともに送り量により増加するためである。また、 $F_d$ が送り量の上昇により増加するのは、 $F_p$ と $F_b$ の比切削抵抗が異なるため送り量の増加により $F_p$ と $F_b$ の差が増大するためである。

Fig.3-12(b)に切削速度を変化させたときの $F_p, F_b$ の関係を示す。 $F_p$ は切削速度の上昇によりあまり変化しないが、 $F_b$ は切削速度の上昇によりわずかに減少する。この要因として切削温度の影響が考えられる。ガラス繊維とエポキシ樹脂の熱伝導率は鋼などに比べて2~3桁小さい<sup>[163],[164]</sup>ため、工具と被削材の摩耗により発生する熱は被削材内部に伝導しにくく、切削速度の上昇により摩擦熱が増大すると切削温度が急上昇する。このとき、繊維は融点が高く切削温度の影響を受けにくいため、 $F_p$ はあまり変化しなかったものと考えられる。一方、樹脂は融点が高いため、切削温度の影響を受け軟化する<sup>[77]</sup>。そのために $F_b$ が減少したものと考えられる。したがって、Fig.3-11(b)において $F_s$ が切



(a) Fs



(b) Fd

Fig.3-10 Relation between thrust and pre-hole diameter.

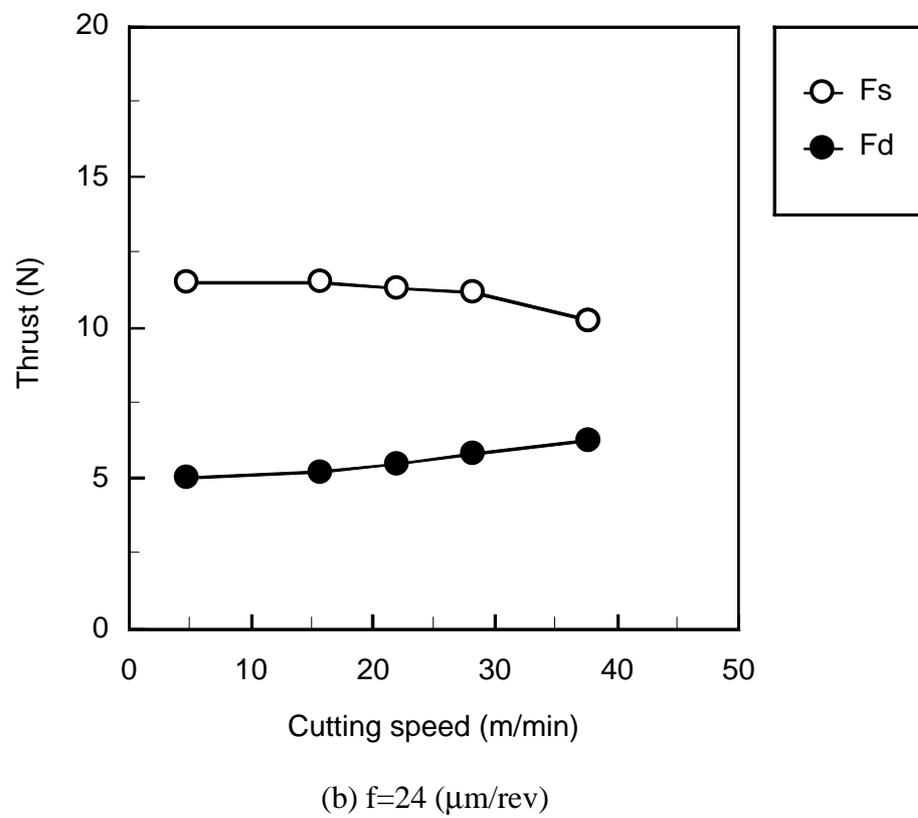
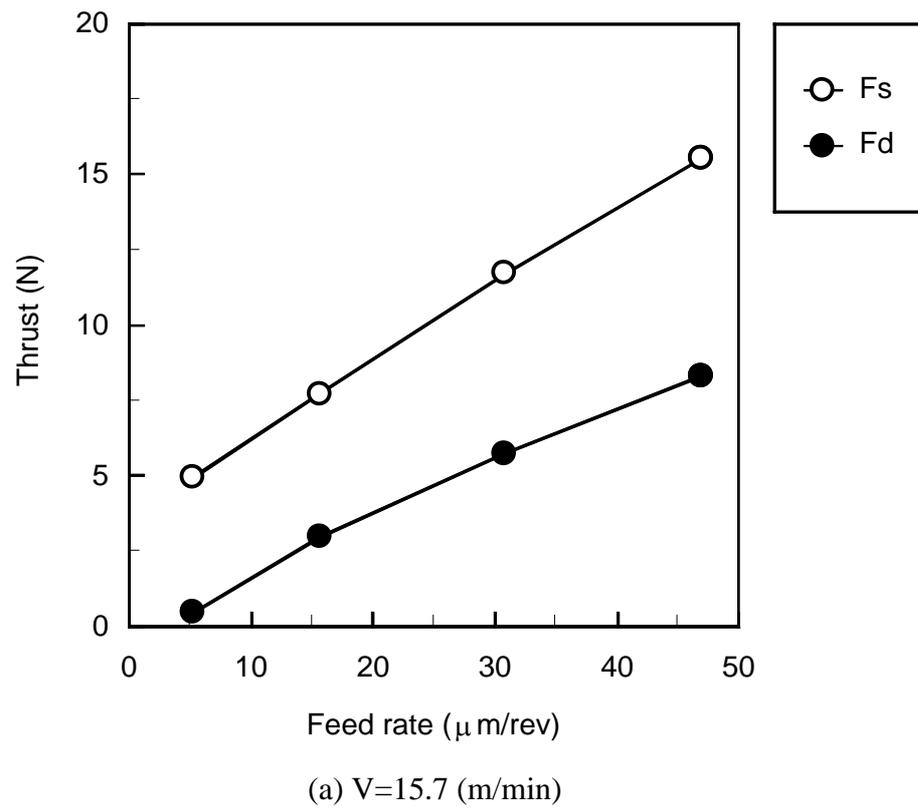
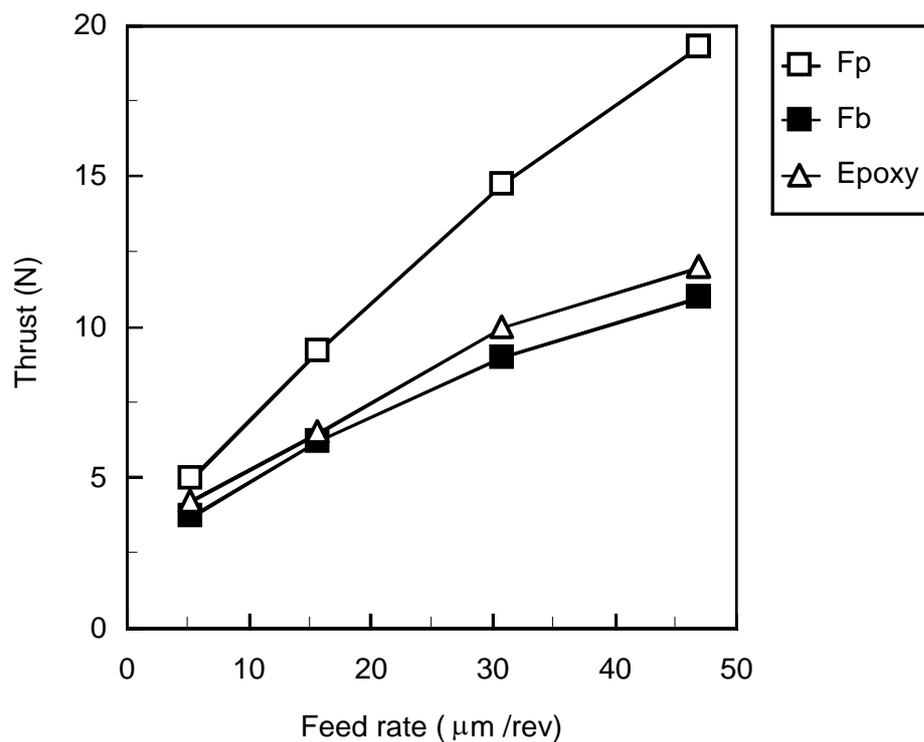
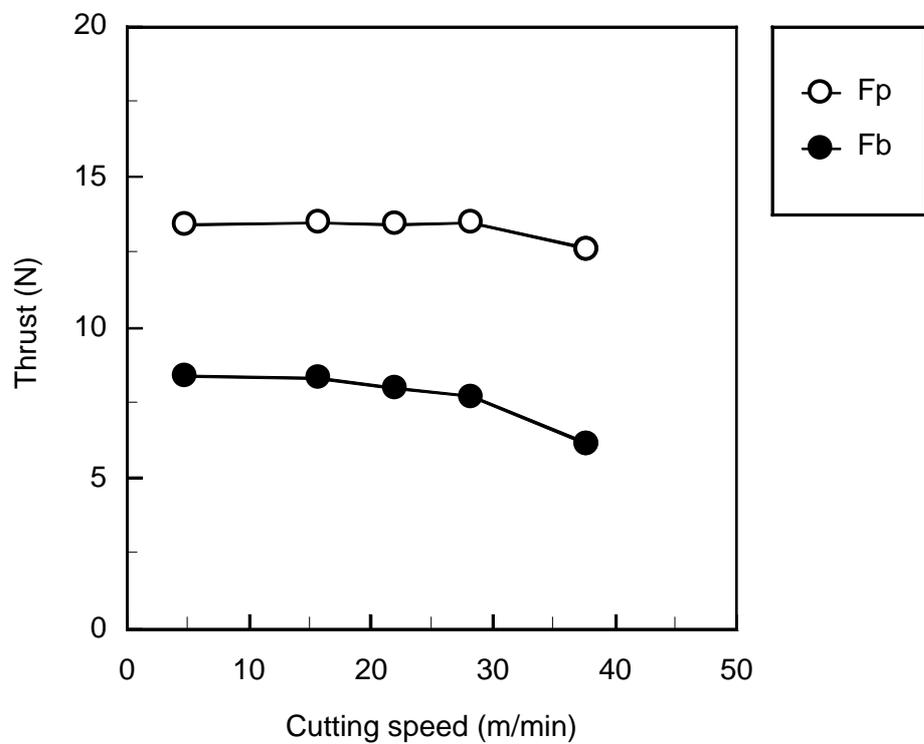


Fig.3-11 Effect of feed rate and cutting speed on thrust ( $F_s$ ,  $F_d$ ).

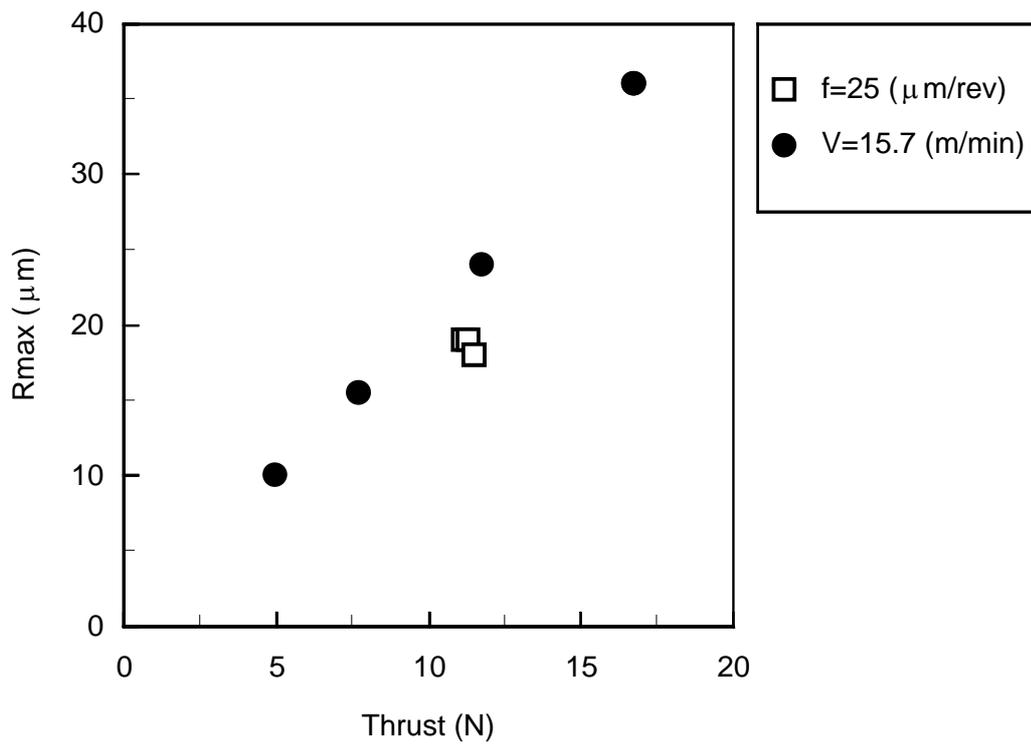


(a)  $V=15.7$  (m/min)

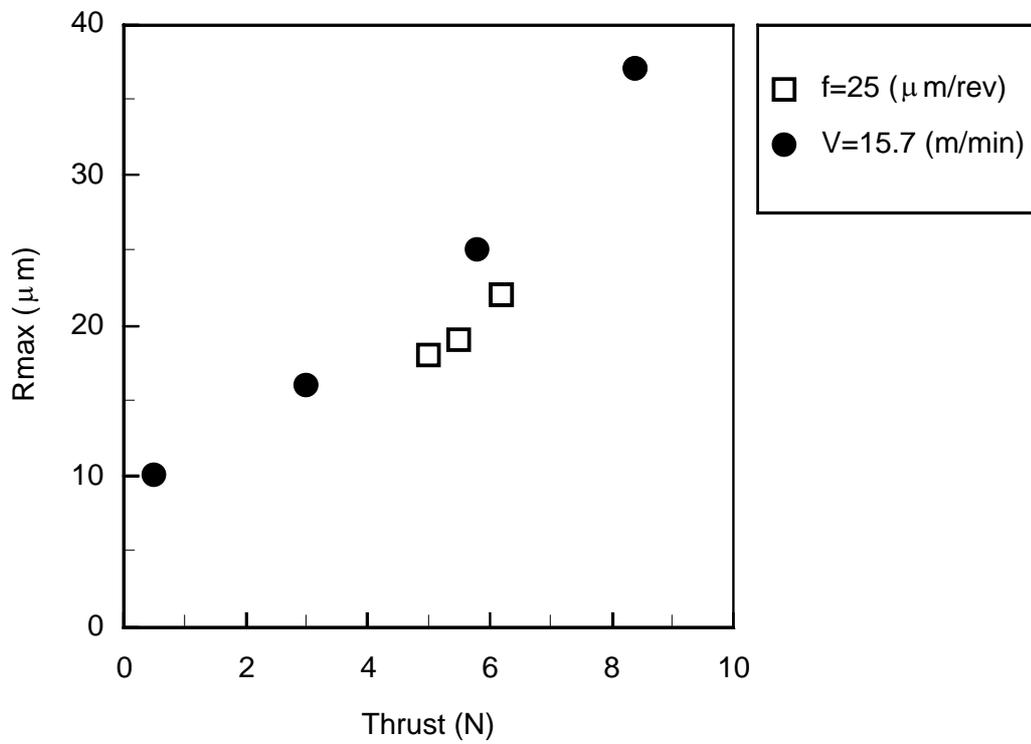


(b)  $f=24$  ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )

Fig.3-12 Effect of feed rate and cutting speed on thrust ( $F_p$ ,  $F_b$ ).

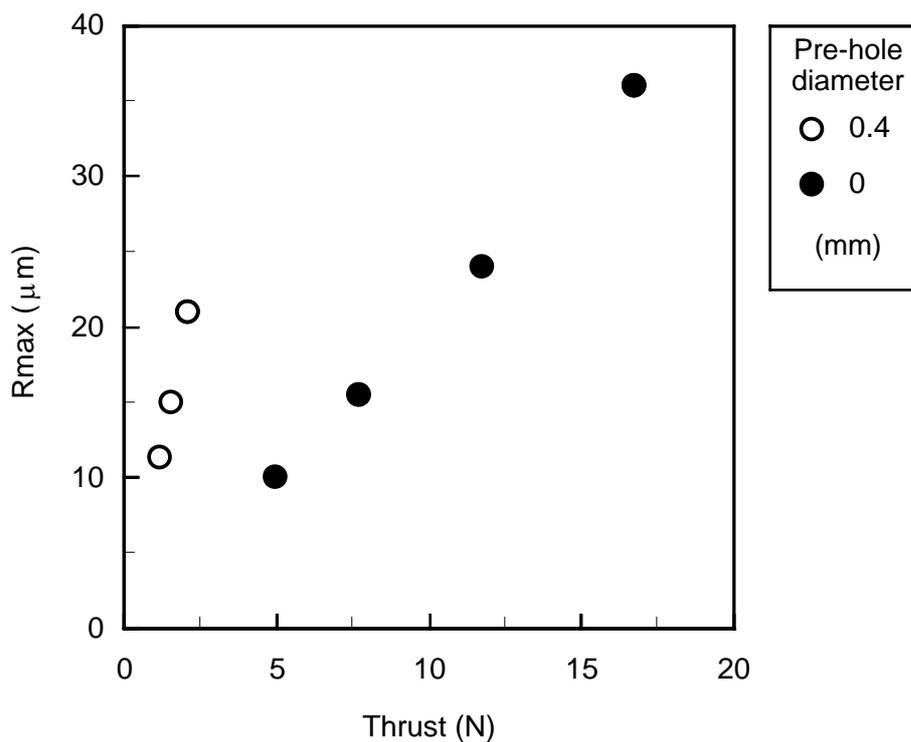


(a)  $F_s$

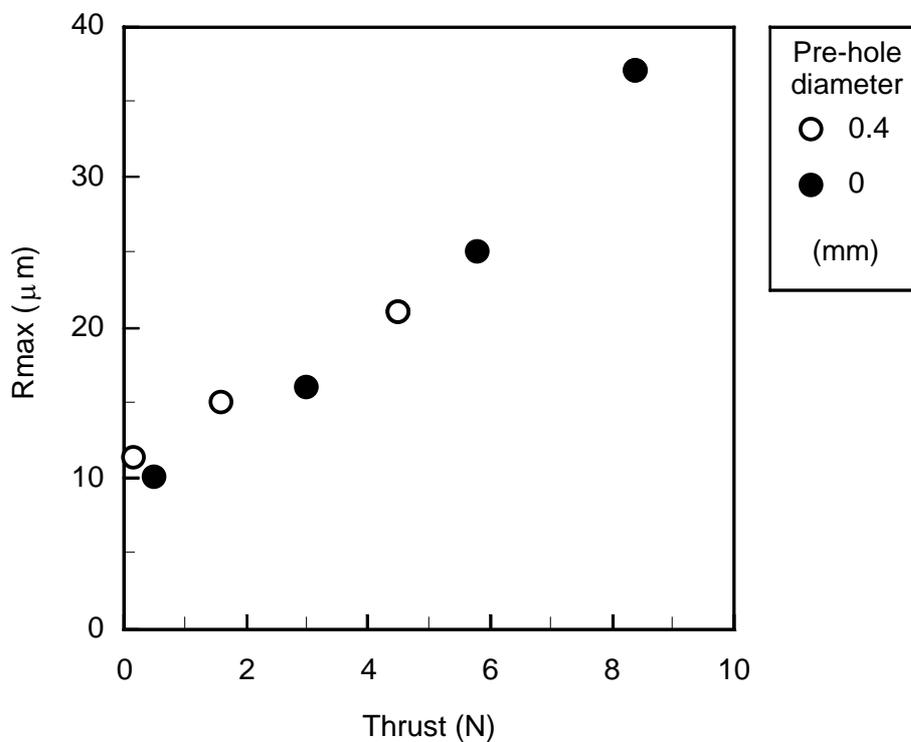


(b)  $F_d$

Fig.3-13 Relation between Rmax and thrust.



(a) Fs



(b) Fd

Fig.3-14 Relation between Rmax and thrust.

削速度の上昇により減少するのは、切削温度の上昇により  $F_b$  は減少するが、 $F_p$  はほとんど変化しないためである。また、 $F_d$  が切削速度の上昇により増加するのは  $F_p$  と  $F_b$  の差が増加するためである。

### 3-3-5 切削抵抗が表面粗さに及ぼす影響

3-3-4 項で、切削条件と  $F_s, F_d$  の関係を調べ、切削条件が切削抵抗に与える影響を明らかにした。そこで本項では、切削抵抗の表面粗さへの影響について調べた。

Fig.3-13(a)は  $F_s$  と表面粗さを、Fig.3-13(b)は  $F_d$  と表面粗さの関係を示す。これらの図より、切削抵抗が上昇すると表面粗さも増加しており、 $F_s, F_d$  ともに表面粗さと深い関係があることが分かる。また、Fig.3-13(a), (b)から、 $F_s, F_d$  の両方とも送り量一定で切削速度を上昇させたときよりも、切削速度一定で送り量を上昇させたときの方が  $F_s, F_d$  の変化が大きく、そのため表面粗さへの影響が大きくなったことが分かる。

次に、下穴の有無による違いと表面粗さの関係を調べた。Fig.3-14(a)は  $F_s$  と表面粗さの関係を、Fig.3-14(b)は  $F_d$  と表面粗さの関係を示す。Fig.3-14(a)より  $F_s$  が上昇すると表面粗さは増加するが、下穴が有る場合と無い場合では異なる直線上にのる。Fig.3-14(b)より、 $F_d$  が上昇すると表面粗さも増加する。また、下穴の有無によらずほぼ一直線上にのる。したがって、表面粗さは  $F_s$  よりも  $F_d$  の影響を大きく受けることがわかる。3-3-4 項より、 $F_d$  は  $F_p$  と  $F_b$  の差により決まり、 $F_p$  は繊維の切削抵抗、 $F_b$  は樹脂の切削抵抗によって決定することから、表面粗さには繊維と樹脂の切削抵抗の差、すなわちGFRPの構成要素である繊維と樹脂の切削特性の差が大きく影響するものと考えられる。

## 3-4 表面粗さと内部損傷について

前項まで表面粗さに対して切削条件が及ぼす影響と切削抵抗との関係を明らかにしてきた。プリント基板の加工穴の表面粗さを測定するためには、加工穴を2つに切断し3-3-1でも示したように回転角毎でガラス繊維の掘り起こしの有無が生じるため粗さが異なる。そのため回転角毎の粗さの測定が必要となり、手間がかかり多大な工程を要する。また、第2章で提案した内部損傷を評価する画像処理システムと比較すると、表面粗さの測定は目視で測定箇所を決定し、1つの加工穴全周の測定が不可能なため、精度が低く加工穴全周の細かい評価は困難となる。

Fig.3-15は内部損傷である損傷幅と表面損傷である最大表面粗さを比較したものである。Fig.3-15より、表面粗さと内部損傷には関係があり、表面粗さが減少すれば内部損傷も低減するため、内部損傷を評価することで加工穴品質の評価は十分と考えられる。

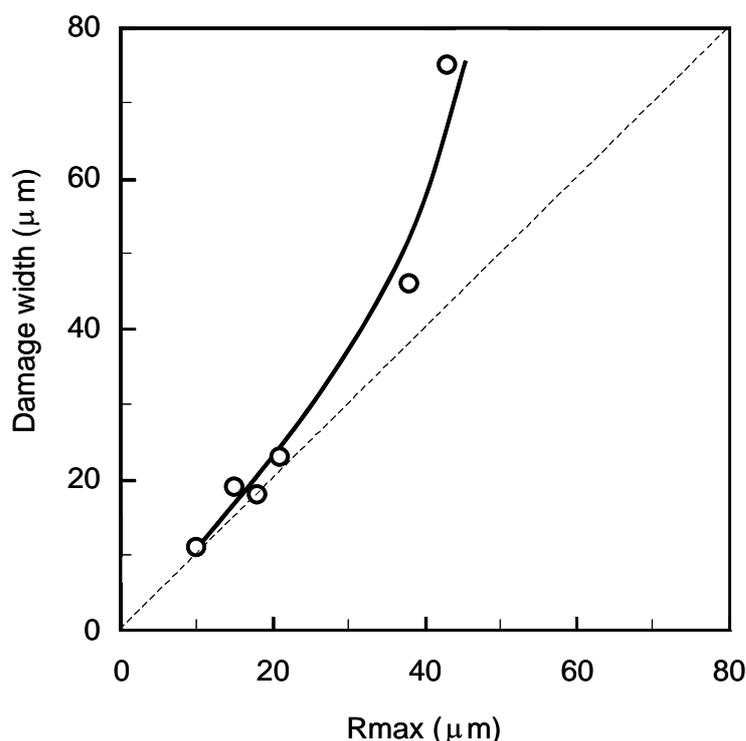


Fig.3-15 Relation between damage width and Rmax.

### 3-5 結 言

GFRPの小径ドリル加工において、加工穴壁面の損傷状態を評価するために、特に表面粗さに注目して切削実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 平織り布材のドリル送り方向の加工穴表面粗さが悪化するの同一回転角に存在する2つの繊維角の繊維で切削状態に差が生じるためである。特に、回転角30deg.において繊維角30deg.方向の繊維のみが掘り起こされるため最も悪くなる。
- (2) GFRPの切削時の切削抵抗(スラスト力)の特徴を静的成分(Fs)と動的成分(Fd)に分離することにより解明した。すなわち、それらのドリル半径方向分布及び切削条件が切削抵抗に与える影響の要因を明らかにした。
- (3) 加工穴表面粗さは、切削速度よりも送り量の影響が大きい。これは、切削抵抗が切削速度よりも送り量の影響を大きく受けるためである。したがって、穴表面の改善には送り量を低減することが有効である。
- (4) 切削抵抗の動的成分は表面粗さに大きく影響することが判明した。これは、GFRPの繊維と樹脂の切削特性の差が表面粗さに大きく影響しているためと考えられる。
- (5) 内部損傷を低減すれば表面粗さも低減でき、内部損傷を評価することで加工穴品質の信頼性評価には十分であることを示した。

---

## 第4章

### 内部損傷の発生形態と加工穴品質の信頼性<sup>[10]</sup>

---

前章では、プリント基板用 GFRP のスルーホール穴あけ加工時の加工穴壁面に発生する表面損傷について、加工条件を変化させて評価した。GFRP の穴あけ加工では表面損傷だけでなく、内部損傷も発生する。本章では、第2章で構築した画像処理を利用した評価システムで GFRP の加工穴周辺に発生する内部損傷の発生形態を調べ、加工条件の内部損傷への影響及び加工穴品質の信頼性の評価を行った。

#### 4-1 緒言

前章では、穴あけ加工の次工程であるメッキ工程で不連続メッキやブローホール等の不良の原因となるガラス繊維の掘り起しに対して、加工穴軸方向の表面粗さを測定し加工条件とスラスト力が及ぼす影響を調べた。また、ドリル加工時のスラスト力を測定しその時間的变化から静的成分と動的成分に分けることによってスラスト力と掘り起しの関係を明らかにした。

GFRP のドリル加工では、加工穴壁面に発生する表面損傷であるガラス繊維の掘り起しだけではなく、ガラス繊維とエポキシ樹脂のはく離などによる内部損傷が加工穴周辺に発生する。G. CAPRINO ら<sup>[137]</sup>は、ドリル加工中のはく離の成長状況を調べるために、ドリル深さを変化させて急停止実験を行い、各深さでの加工穴断面の損傷状態を光学顕微鏡を用い測定している。S. Jain<sup>[148]</sup>らや R. STONE ら<sup>[138]</sup>は、ドリル加工時に積層板の加工穴出口部で主に積層間のはく離が発生することがドリルチゼル部の影響であることを示している。いずれの研究も、加工穴出口部のはく離に関するものである。しかし、実際のプリント基板のドリル加工では、被削材の下部にベークライト等の当て板を使用している。本研究ではこの下部当て板を使用した方法を採用しており、出口部ではく離を抑制する方法で実験を行っている。2-3-2項でも示したように、FRP の加工穴周辺に発生する内部損傷の形態は同条件のものでも非常にばらつき、その発生形態は異方性を示して

いる。しかし、上記に示した研究では内部損傷の定量的な調査には至っておらず、第1章でも述べたように内部損傷の評価方法については未だに確立されていない。

そこで、本章では内部損傷の評価に第2章で構築した画像処理システムを利用して加工条件が及ぼす影響を調べた。さらに、ドリルのチゼル部が内部損傷に及ぼす影響を見るために下穴実験も行った。

## 4-2 実験方法

実験に使用した被削材は、ガラスクロス基材エポキシ樹脂板で最も多用されている JIS-GE4F とした。ガラスクロスは 7628 (IPC-EG-140 の規格名称) で、ガラス繊維は E ガラスを使用している。板厚 1.6mm (ガラスクロス積層数 8 層) の積層板と板厚 0.2mm (ガラスクロス積層数 1 層) の一層材を用いた。Table 2-1 に E ガラスの諸特性を、Table 2-2 にガラスクロスの諸特性を、Table 2-3 にエポキシの諸特性を示す。

穴あけは遠州工業社製立フライス盤 (TYPE ENSHU-V1) の主軸に日本精密工作社製のハイスピンドルモーター (HS-220) を取り付けてドリル加工を行った。工具は MMC コベルコツール社製プリント基板用超硬ドリル (KUM100, 直径 1mm) である。Fig. 2-2 に使用したドリルの主要寸法を、Table 2-4 に仕様を示す。実験においては Fig. 2-3 に示すように、通常のプリント基板の穴あけ時と同様にドリルの振れを抑え、入り口部のバリを防ぐために上部当て板としてアルミニウム板 (板厚 0.2mm) を、ドリルの破損及び出口部のバリを防ぐために下部当て板としてベークライトを使用した。出口部で当て板無しでドリル加工を行った場合には、ドリルチゼルの推力で穴出口部の方向にガラス繊維がはく離することが知られている<sup>[151]</sup>が、本加工では十分な当て板で保持することで、このようなはく離を防止してある点が特徴である。また、一層材は上部当て板と積層板の間に挟んで同時に加工した。これにより、積層板と一層材の切削状態は一致している。Table 2-5 に切削条件を示す。また、穴あけ実験は乾式加工で行い、加工回数の増加から工具摩耗によるデータへの影響を低減するために、工具は 2 ~ 3 回のならし加工を行った後に使用し、加工回数は 50 回を上限とした。

一層材の内部損傷の観察にはニコン社製実体顕微鏡 (SMZ-U) を使用し、画像処理は実体顕微鏡に日本ビクター社製 CCD (Charge Coupled Device) カメラ (TK-1070) を取り付け、ピアス社製画像処理装置 (PIAS- ) を使用した。使用した CCD カメラの有効画素数は 768 (水平) × 493 (垂直) である。一層材の内部損傷の評価には 2-2-2 項で説明した画像処理システムを使用した。

### 4-3 実験結果及び考察

#### 4-3-1 加工条件の損傷幅に及ぼす影響

Fig.4-1は一層材の加工穴の光透過顕微鏡写真を示したものである。Fig.4-1(a),(b)より送り量一定で切削速度を変化させた場合、加工穴周辺に内部損傷が発生するが、切削速度を増加させても損傷形態にそれほど差が見られない。Fig.4-1(c),(d)より、切削速度一定で送り量を変化させた場合、送り量の小さいFig.4-1(c)の加工穴の内部損傷はわずかに発生しているのが観察されるが、送り量の大きいFig.4-1(d)の加工穴周辺の内部損傷は大きく発生しているのが観察される。したがって、内部損傷は切削速度よりも送り量に大きく影響されることが考えられる。

画像処理システムを使用して、回転角10deg.毎に求めた100サンプルの損傷幅の平均値(25個の加工穴を4分割している)と回転角の関係を調べたものをFig.4-2に示す。すべての加工条件において、損傷幅は回転角に対して均一に発生しておらず、回転角によって損傷幅は異なる、すなわち異方性を示していることが分かる。特に、異方性の大

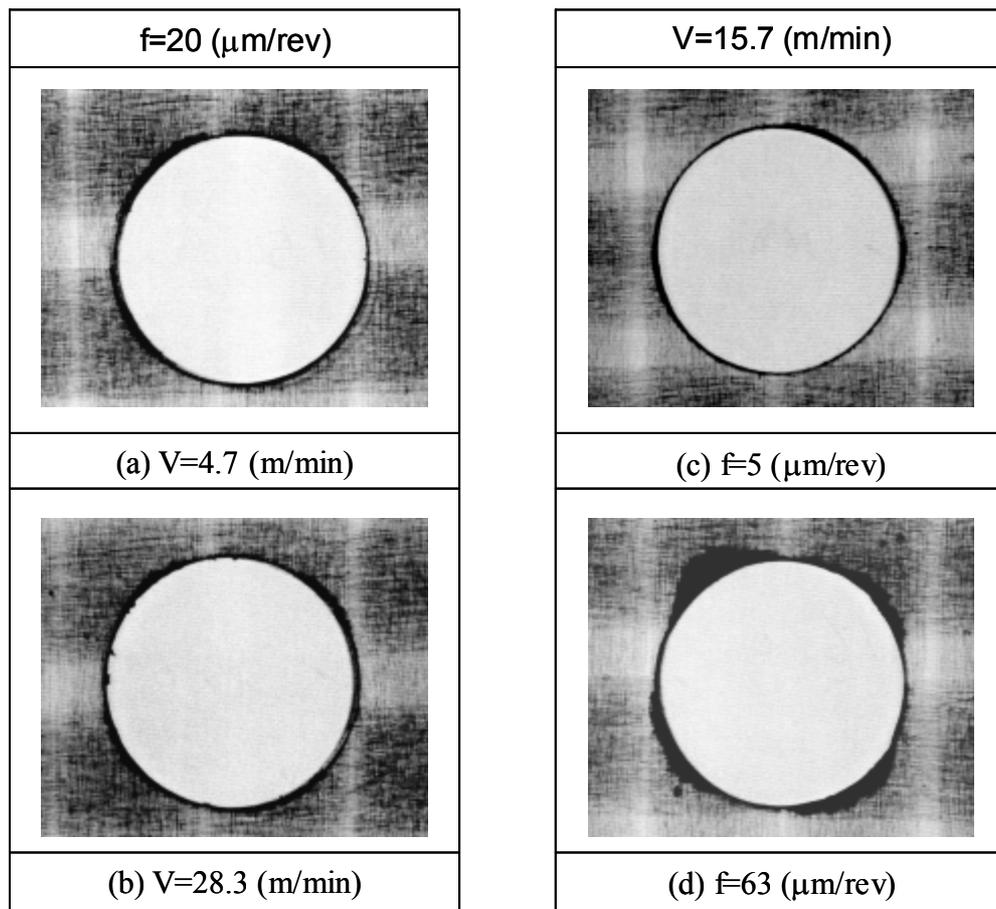
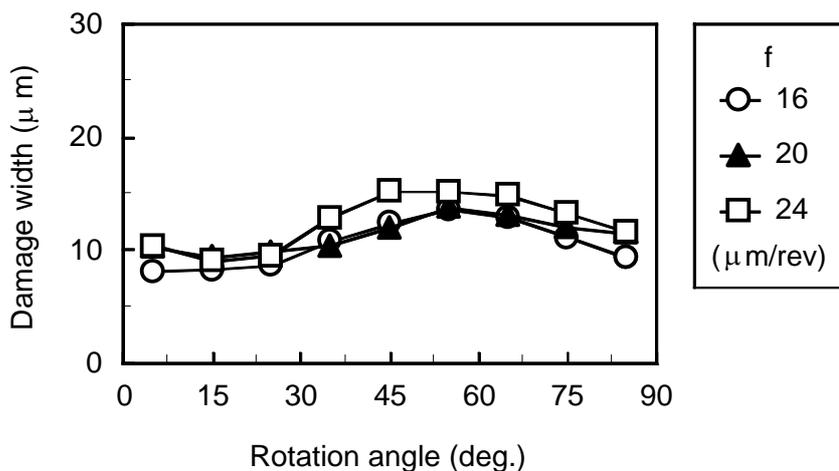
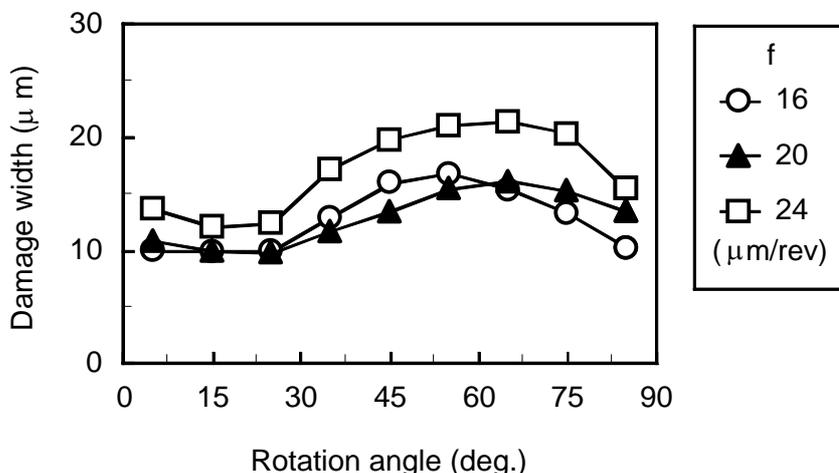


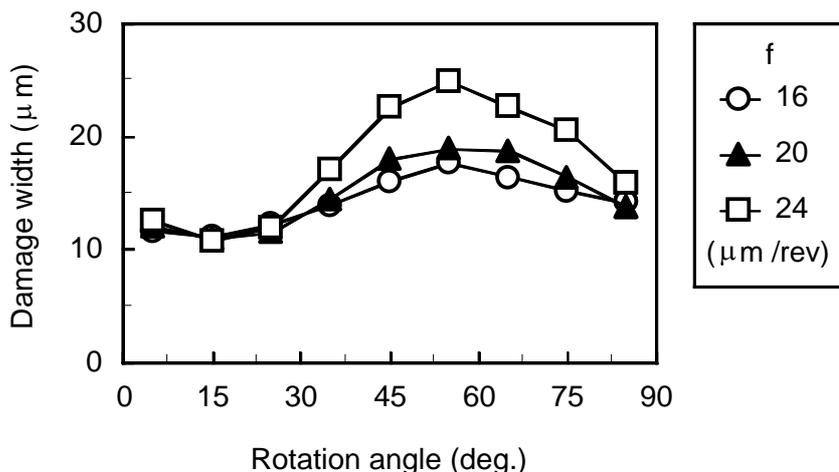
Fig.4-1 Micrographs of drilled one ply lamina.



(a) V=4.7 (m/min)



(b) V=15.7 (m/min)



(c) V=28.3 (m/min)

Fig.4-2 Relation between damage width and rotation angle.

きいFig.4-2(c)の $f=24\mu\text{m}/\text{rev}$ の時の損傷幅に注目すると、回転角 $0 \sim 30\text{deg.}$ では約 $12\mu\text{m}$ 前後となり、回転角 $30\text{deg.}$ 付近から増加し始め回転角 $60\text{deg.}$ 付近で最大値約 $25\mu\text{m}$ となり、その後減少し回転角 $80\text{deg.}$ 付近では約 $15\mu\text{m}$ になる。したがって、損傷幅はFig.2-14の一層材の光透過顕微鏡写真でも示したように、回転角 $30\text{deg.}$ 付近から大きくなり、回転角 $60\text{deg.}$ 付近で極大値をとる。また、損傷幅は回転角 $0\text{deg.} \sim 90\text{deg.}$ の範囲で1つの極大値が存在する、すなわち回転角 $0\text{deg.} \sim 360\text{deg.}$ の範囲で考えると、1つの加工穴で4つの損傷幅の極大値が存在することになり、これがクロス材のドリル加工の特徴と言える。

各切削速度とも送り量が大きくなるにつれて、損傷幅の異方性(極大値と極小値の差)が大きくなる。これは、送り量が大きくなるほど1刃により切削される繊維数が多く、繊維1本当たりを切断するのに要する力を一定と考えると、繊維束にかかる力は大きくなり、この繊維束を支える樹脂の負担が大きくなるため損傷が増大し、異方性が大きくなるものと考えられる。また、切削速度が大きくなると、送り量による異方性の差が大きくなるのは、切削速度の増加に伴い切削温度が上昇し、エポキシ樹脂の粘性が低下するため、樹脂の繊維への束縛力が低下し、繊維束の影響が大きく現れるためと考えられる。

そこで、切削速度及び送り量が損傷の異方性に及ぼす影響度合いについて検討する。送り量を一定(例えば送り量 $24\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合)とし、切削速度を $4.7\text{m}/\text{min}$ から $28.3\text{m}/\text{min}$ に増加すると、異方性の大きさ(回転角による損傷幅の差)は約 $5\mu\text{m}$ から約 $15\mu\text{m}$ に増加している。すなわち、切削速度を6倍にすると回転角による損傷幅の差は3倍となる。一方、切削速度を一定(例えば切削速度 $28.3\text{m}/\text{min}$ の場合)とし、送り量を $16\mu\text{m}/\text{rev}$ から $24\mu\text{m}/\text{rev}$ に増加すると、異方性の大きさは約 $5\mu\text{m}$ から約 $15\mu\text{m}$ に増加している。すなわち、送り量を1.5倍にすると回転角による損傷幅の差は3倍となる。従って、損傷の異方性に及ぼす影響度合いは送り量の方が切削速度より4倍ほど大きい。これらの結果は、加工能率(送り量 $\times$ 切削速度)を一定にしても送り量を減少することにより、加工穴の異方性を低減可能であることを示している。

#### 4-3-2 加工穴品質の信頼性

GFRPの加工面品質は掘り起こしの発生の有無など、かなりばらつくことが分かった。プリント基板のスルーホールにおいては、加工面品質のみならずその信頼性も重要である。そこで、損傷幅のばらつきをみるために、損傷幅の度数分布を調べた。また、プリント基板の実装密度の向上に伴い、スルーホールのファインピッチ化によってFig.4-3に示すように内部損傷がスルーホール間で重なり合う可能性がある。電子・電気機器の致命的な故障につながるイオンマイグレーションはガラス繊維束に沿って発生すること

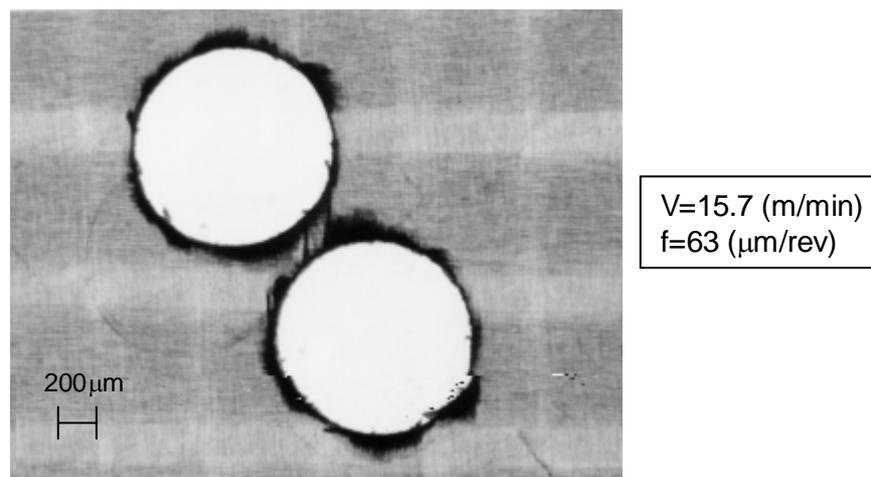
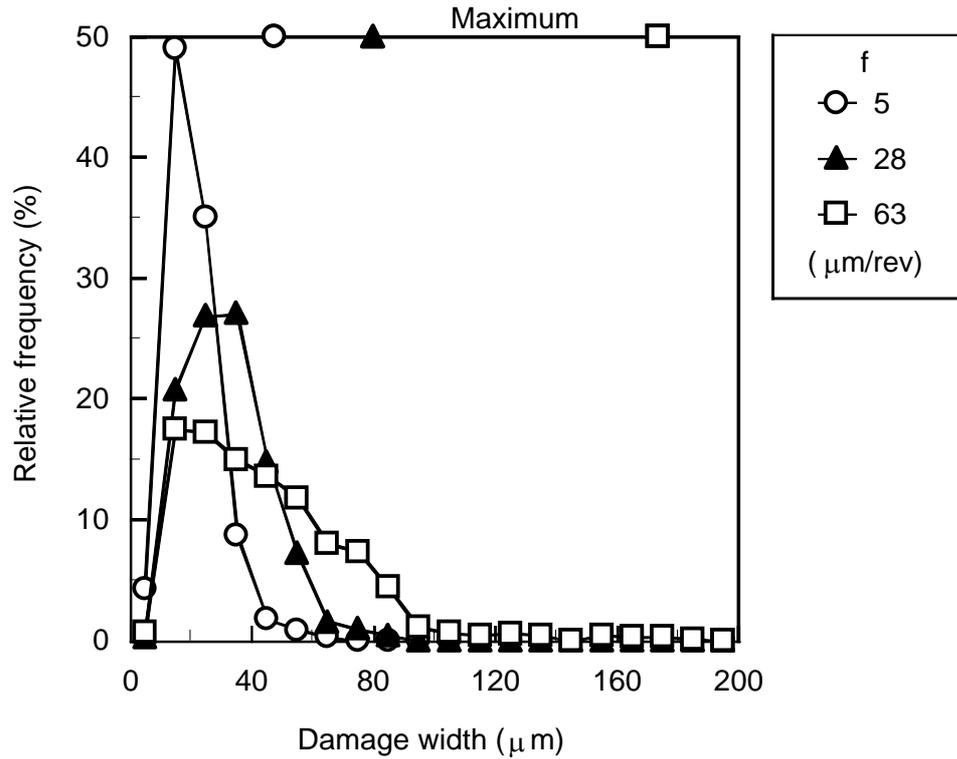


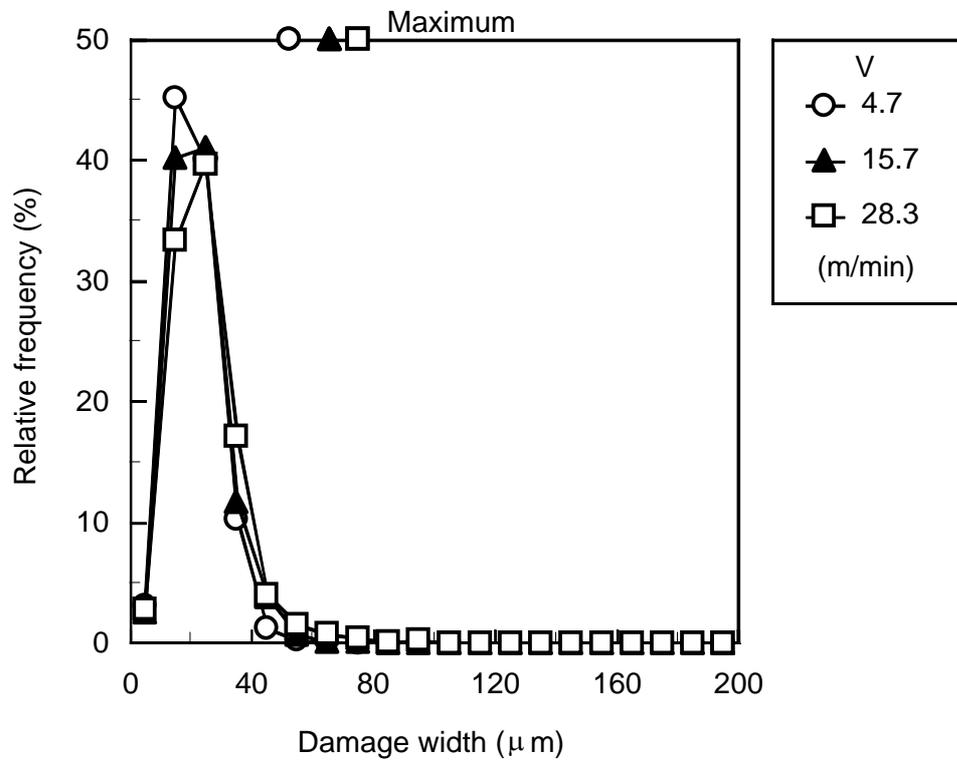
Fig.4-3 Micrograph of drilled one ply lamina.

から、スルーホール間の内部損傷の重なり合いはイオンマイグレーションの発生を誘発し、異なる回路間の接続の原因となり、加工穴品質の信頼性が著しく低下する。そこで、損傷幅のばらつきに加えて損傷幅の最大値も調べた。

Fig.4-4は、損傷幅と相対度数の関係を示す。また、同図には損傷幅の最大値をあわせて示している。Fig.4-4(a)より切削速度を一定で送り量を変化した時の送り量の小さい $5\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、損傷幅が $10\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ の範囲で度数が約50%、また損傷幅が $20\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ の範囲では度数が約35%となり、ほとんどの損傷幅が $10\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ の範囲に存在する。送り量 $28\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、損傷幅が $10 \sim 20\mu\text{m}$ の範囲ではその度数が約20%、損傷幅 $20\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ 及び $30\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ では度数が約27%、損傷幅 $40\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ の範囲では度数が約15%、損傷幅 $50 \sim 60\mu\text{m}$ の範囲では度数が約8%となり、損傷幅のほとんどは $10\mu\text{m} \sim 60\mu\text{m}$ の範囲に存在する。送り量の大きい $63\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、損傷幅 $10 \sim 20\mu\text{m}$ 及び $20\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ の範囲で度数が約18%、損傷幅 $30\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ 及び $40\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ で度数が約15%、損傷幅 $50\mu\text{m} \sim 60\mu\text{m}$ で度数が約13%、損傷幅が $60\mu\text{m} \sim 70\mu\text{m}$ 及び $70\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$ で度数が約8%、損傷幅が $80\mu\text{m} \sim 90\mu\text{m}$ で度数が約5%となり、損傷幅のほとんどが $10\mu\text{m} \sim 90\mu\text{m}$ の範囲に存在する。このように、切削速度一定で送り量を変化させた場合、送り量が増加するほど損傷幅のばらつきが大きくなる。損傷幅の最大値に注目すると、 $f=5\mu\text{m}/\text{rev}$ では約 $40\mu\text{m}$ 、 $f=28\mu\text{m}$ では約 $80\mu\text{m}$ 、 $f=60\mu\text{m}/\text{rev}$ では約 $180\mu\text{m}$ となり、送り量が増加するほど最大値も大きくなることが分かる。また、損傷幅の最大値が大きいほど、損傷幅のばらつきも大きくなる。特に $f=60\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合には、最大値が発生する確立は約0.1%程度であるが、スルーホールのピッチを決定する場合、Fig.4-1に示すスルーホール間の内部損傷が重なり合わないよう、安全を見て損傷幅の最大値約 $180\mu\text{m}$ を考慮する必要があると考えられる。



(a)  $V = 15.7$  (m/min)



(b)  $f = 20$  ( $\mu\text{m/rev}$ )

Fig.4-4 Relation between relative frequency and damage width.

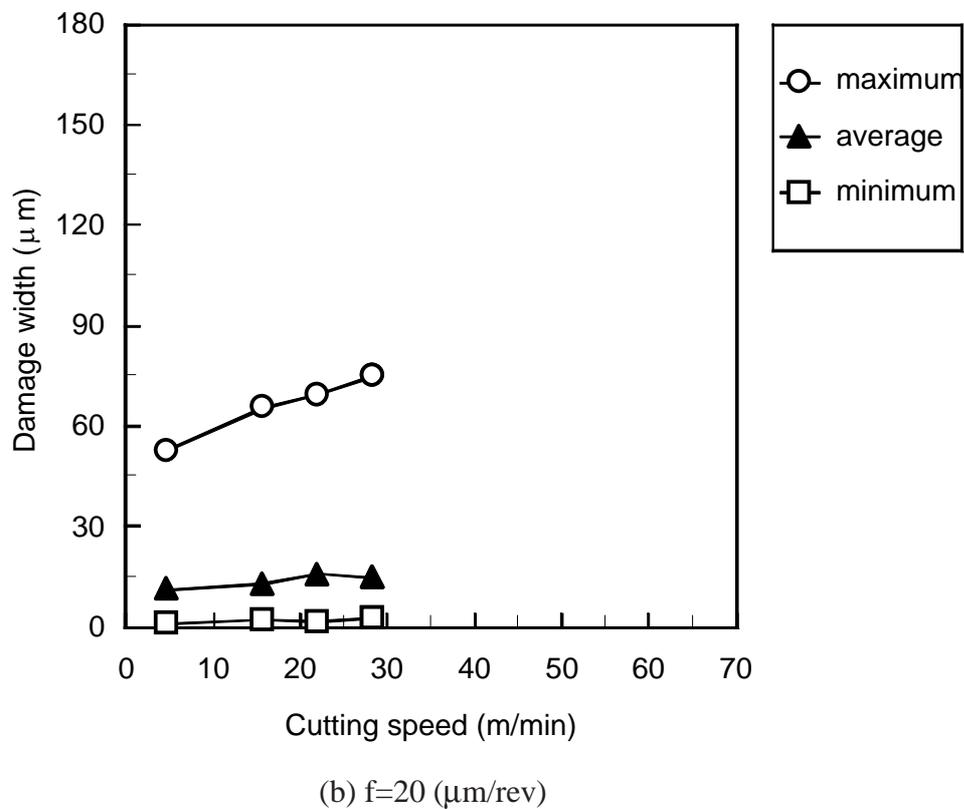
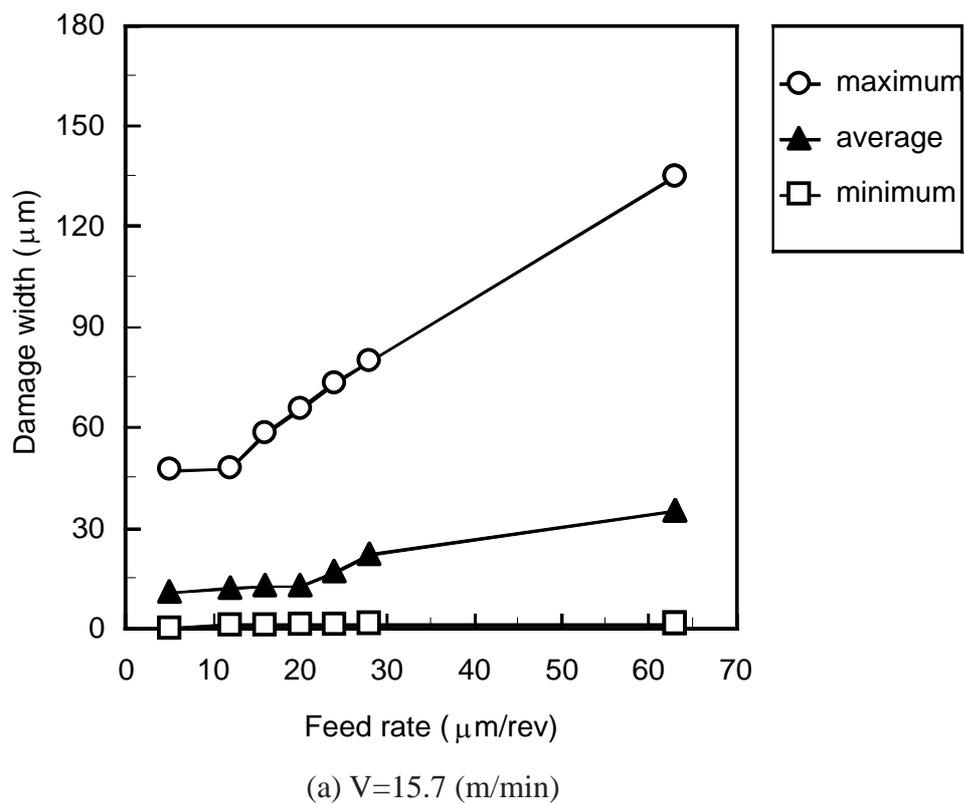


Fig.4-5 Maximum, average and minimum damage width.

一方, Fig.4-4(b)より送り量一定で切削速度を変化させた場合,  $V=4.7\text{m/min}$ では損傷幅は $10\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ の範囲にほとんどが存在する. また,  $V=15.7\text{m/min}$ 及び $V=28.3\text{m/min}$ の場合にも損傷幅は $10\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ の範囲にほとんどが存在しており, 損傷幅のばらつきに対する切削速度の影響は少ないことが言える. また, 損傷幅の最大値に注目すると $V=4.7\text{m/min}$ では約 $50\mu\text{m}$ ,  $V=15.7\text{m/min}$ では約 $65\mu\text{m}$ ,  $V=28.3\text{m/min}$ では約 $75\mu\text{m}$ となり, 切削速度が増加しても損傷幅の最大値の増加割合は小さい. したがって, 損傷幅のばらつき及び最大値は切削速度に比べ送り量の影響を大きく受けることが分かった. その理由として, 送り量を増加させた場合には, 1刃により切削される繊維束が大きくなり, 繊維にかかる力が大きくなるため, 損傷幅の平均値が大きくなるとともに, 繊維束の強度のばらつきの影響を受けやすくなるためと考えられる. また, 切削速度を増加させた場合には, 繊維にかかる力はほとんど変化しないが, 切削速度の上昇によりエポキシ樹脂が軟化し, 繊維にかかる力の影響を受けやすくなるために, このような結果になったものと考えられる. 実際の加工において, 加工能率を低下させずに加工面品質の信頼性を向上(損傷幅の平均値とばらつきの低減)するためには, 損傷幅とそのばらつきに対する送り量と切削速度の影響の違いより, 送り量を小さくし切削速度を大きくすることが有効である.

次に, 加工条件が損傷幅の最大値, 平均値及び最小値(900サンプル中)に及ぼす影響について調べる. Fig.4-5(a)は切削速度を一定とした時の損傷幅の最大値, 平均値及び最小値と送り量の関係を示したものである. Fig.4-5(a)より, 損傷幅の最小値は送り量が増加しても $10\mu\text{m}$ 以下でほとんど送り量の影響を受けないことが分かる. 損傷幅の平均値は送り量の増加に伴いわずかに増加する傾向にある. 損傷幅の最大値は送り量の増加に伴い増大する傾向である. Fig.4-5(b)は送り量を一定とした時の損傷幅の最大値, 平均値及び最小値の関係を示したものである. Fig.4-5(b)より, 損傷幅の最小値及び平均値は切削速度が増加しても, ほとんど変化しないことが分かる. 損傷幅の最大値は切削速度の増加に伴い緩やかに増加する傾向である. Fig.4-5(a)と(b)の損傷幅の最大値を比較すると, 損傷幅の最大値は切削速度よりも送り量の影響を大きく受けることが明らかである. これは4-3-1項の回転角と損傷幅の関係の結果と同様であり, 送り量の増加が加工穴品質の信頼性を著しく低下させる.

#### 4-3-3 下穴の有無による内部損傷への影響

本実験では下部当て板としてベークライトを使用しているが, 出口部で当て板無しでドリル加工を行った場合には, ドリルチゼルの推力で加工穴出口部の方向にガラス繊維がはく離することが知られている. このようなはく離を防止するために本加工では十分な当て板を使用しているが, 下部当て板を使用した場合のチゼルが内部損傷に及ぼす影

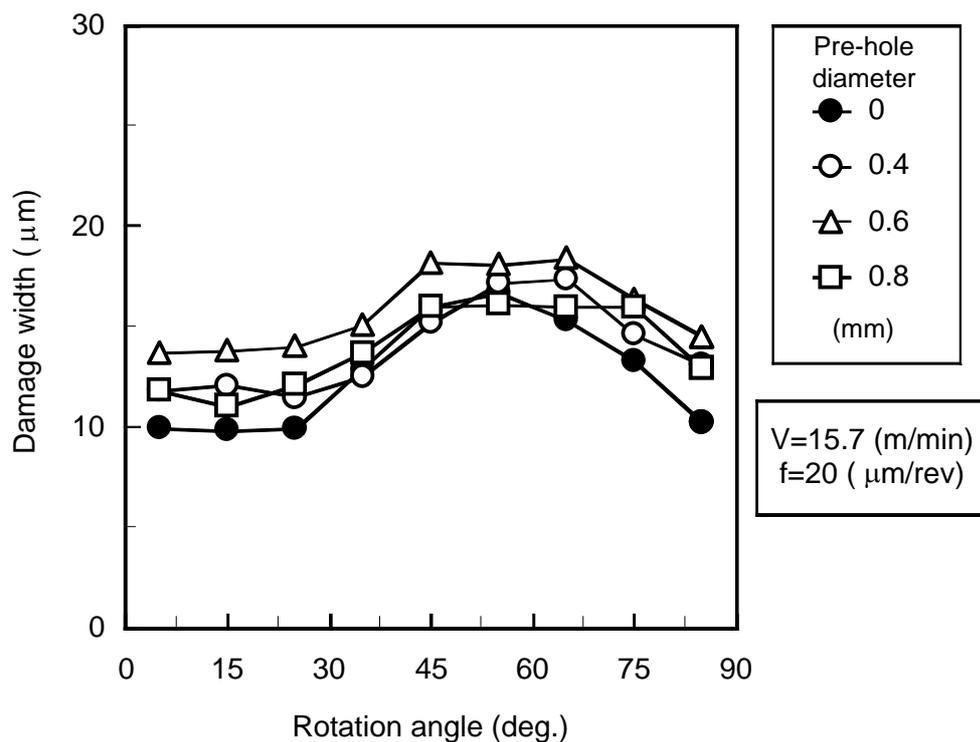


Fig.4-6 Relation between damage width and rotation angle.

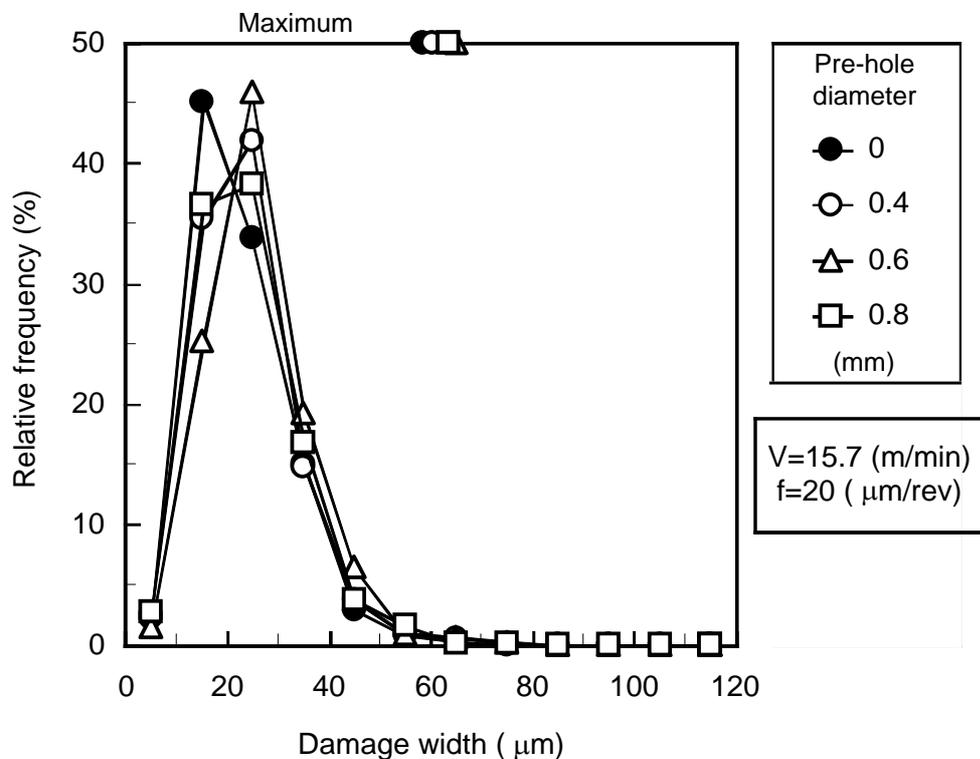


Fig.4-7 Relation between relative frequency and damage width.

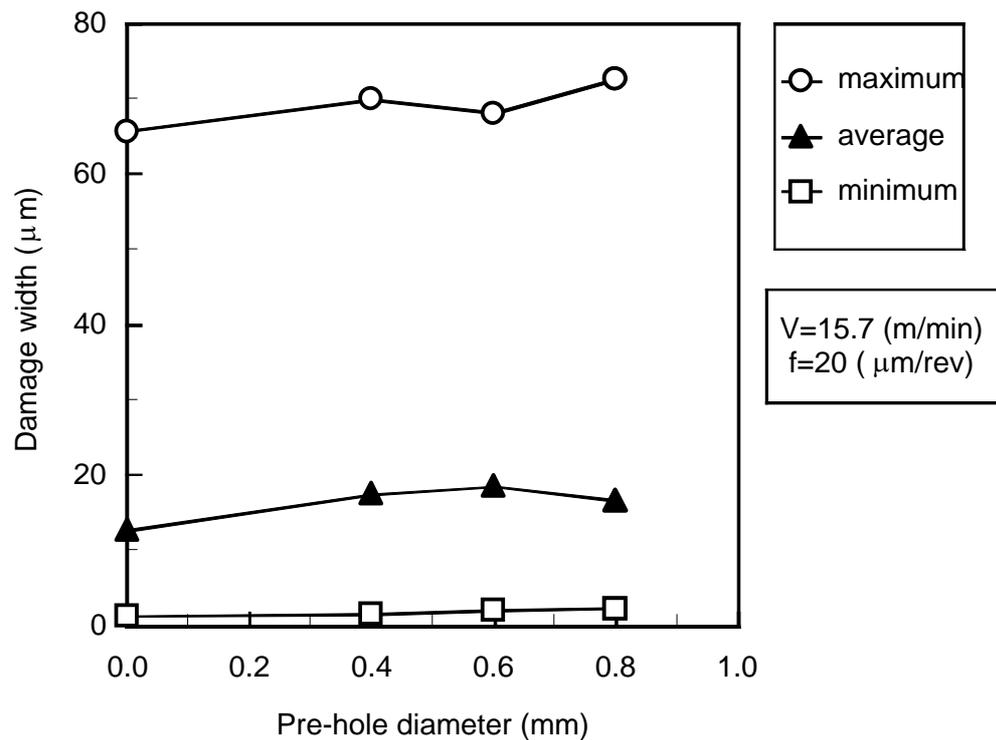


Fig.4-8 Maximum, average and minimum damage width.

響を調べた実験はほとんどされていない。そこで、本項ではチゼルの有無が内部損傷に及ぼす影響について調査した。

Fig.4-6は下穴0.4mm, 0.6mm, 0.8mm及び下穴無しでドリル加工を行った時の損傷幅と回転角の関係を示したものである。実験で使用したドリルのチゼル部の直径は約0.2mmであるので、今回使用した下穴径は完全にチゼル部よりも大きく、ドリル切れ刃のみで加工されることになる。Fig.4-6より下穴無しの場合、4-3-1項でも説明したように、損傷幅は回転角30deg.付近から増加し始め回転角60deg.付近で最大となることが分かる。下穴0.4mm, 0.6mm, 0.8mmの場合の損傷幅も下穴無しと同様な損傷形態となる。下穴の有無で損傷幅を比較すると、およそ $2\mu\text{m}$  ~  $3\mu\text{m}$ 程度の違いがあるものの、ほとんど損傷幅は同じと言える。したがって、損傷幅は下穴の影響が少なく、ドリル切れ刃により内部損傷が発生すると考えられる。

下穴の有無が損傷幅のばらつきに及ぼす影響を見るために、損傷幅の度数分布を調べた。その結果をFig.4-7に示す。Fig.4-7より、下穴の無い場合、損傷幅は $10\mu\text{m}$  ~  $30\mu\text{m}$ の範囲にほとんど存在している。下穴の有る場合も下穴無し同様に損傷幅のほとんどが $10\mu\text{m}$  ~  $30\mu\text{m}$ の範囲に存在している。したがって、損傷幅のばらつきは下穴の影響をほとんど受けないことが分かった。また、下穴の有無による損傷幅の最大値、平均値及び最小値をFig.4-8に示す。Fig.4-8より、下穴無しの損傷幅の最小値及び平均値は、下

穴有りの場合とほとんど同じである。損傷幅の最大値に関しても下穴無しと有りとはほとんど変化がみられない。したがって、損傷幅の最小値、平均値及び最大値は下穴の影響をほとんど受けないことが分かった。

本項冒頭でも述べたように、本実験では内部損傷に対するチゼルの影響を調べるために、下穴実験を行った。その結果、内部損傷の形態及び損傷幅は下穴の有無に関係なく、すなわちチゼルの影響をほとんど受けず、切れ刃により加工穴周辺に内部損傷が発生することが判明した。

#### 4-4 結 言

プリント基板用GFRPの内部損傷を評価するために構築した画像処理システムを使用して、内部損傷の発生形態を調べ、さらに、ドリルのチゼル部の内部損傷に与える影響を調査するために下穴実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 内部損傷の評価に画像処理装置を使用して、損傷幅と回転角の関係を調べた結果、内部損傷の異方性は切削速度よりも送り量に大きく影響される。
- (2) 損傷幅のばらつきを調べた結果、切削速度よりも送り量の影響を大きく受け、送り量を低減するとそれらの損傷幅のばらつきは小さくなり、加工穴品質とその信頼性を向上するためには、送り量の低減が有効であること示した。
- (3) ドリルのチゼル部の内部損傷への影響を調べるために下穴実験を行った結果、損傷幅はチゼル部に影響されないことが分かった。したがって、内部損傷はドリル切れ刃により発生することが判明した。

---

## 第5章

# ガラスクロスに対する加工穴位置の違いによる加工穴品質への影響<sup>[6],[7],[14]</sup>

---

前章では、GFRPの穴あけ加工時に加工穴周辺に発生する内部損傷に対して加工条件の影響を調べ加工穴品質の信頼性を評価した。また、第2章で述べたようにGFRP加工穴の内部損傷の発生形態は非常にばらつく。内部損傷の発生形態のばらつきは加工穴品質の信頼性低下となり重大な問題である。そこで、本章ではGFRP加工穴の内部損傷の発生形態のばらつきの原因を解明する。ばらつきの原因を解明する際に第2章で構築した画像処理システムを利用し定量的に内部損傷を測定する。その際、ドリル中心位置とガラスクロスの相対位置に着目し内部損傷の発生形態の特徴を調べる。さらに、切削部のガラスクロスの繊維束厚さにも注目し、繊維束厚さの異なる材料を加工し内部損傷との関係を考察する。

### 5-1 緒言

前章では、第2章で提案した画像処理システムを利用してGFRPの内部損傷の発生形態を調査し、加工条件が内部損傷に及ぼす影響を調べた。前章での内部損傷の評価では、主に各サンプルの損傷幅の平均値を算出している。平均値の評価では全体的な傾向を調べるには有効であるが、2-3-1項でも示したようにGFRPの内部損傷はサンプル毎に観察すると同一加工条件下でも非常に異なる発生形態を示している。また、第1章でも述べたように、GFRPはガラス繊維とエポキシ樹脂という性質の異なる材料から構成されるため、同一切削条件で加工した被削材の内部損傷に大きなばらつきが生じる。これまでの章で、このばらつきに関しては2-3-1項で考察してきたが、内部損傷の発生形態の要因に関しては不明な点が多く残っている。また、このようなFRPの切削において損傷のばらつきについて論じているものは著者の知る限りでは皆無に等しい。したがって、このばらつきについて定量的に評価しその原因を解明する必要がある。

そこで本章では、ドリル中心位置とガラスクロスの繊維束との相対位置関係に着目し、加工穴壁面の内部損傷を測定した。そして、ガラスクロスに対するドリル中心位置を分類することにより、内部損傷の発生形態の特徴を明らかにする。また、内部損傷の発生形態のばらつきの要因として、これまでに指摘した切削方向と繊維角の関係に加え、切削部の繊維束厚さにも注目して内部損傷との関係を検討する。ガラスクロスに対するドリル中心位置の違いにより、スラスト力の特徴についても調べた。さらに、繊維束厚さの異なる5種類の材料を加工条件を変化させて穴あけ加工を行い、それぞれの材料に対する内部損傷を測定し、繊維束厚さが内部損傷に及ぼす影響を調べ、加工条件と内部損傷の関係から内部損傷の低減に有効な加工条件について検討し、送り量と切削部の繊維束厚さから内部損傷との関係式を導き出した。

## 5-2 実験方法及び評価方法

### 5-2-1 被削材及び実験装置

実験に使用した被削材は、ガラスクロス基材エポキシ樹脂板で最も多用されているJIS-GE4Fとした。ガラスクロスは7628 (IPC-EG-140の規格名称)で、ガラス繊維はEガラスを使用している。板厚1.6mm (ガラスクロス積層数8層)の積層板と板厚0.2mm (ガラスクロス積層数1層)の一層材を用いた。Table 2-1にEガラスの諸特性を、Table2-2にガラスクロスの諸特性を、Table2-3にエポキシの諸特性を示す。

穴あけは遠州工業社製立フライス盤 (TYPE ENSHU-V1) の主軸に日本精密工作社製のハイスピンドルモーター (HS-220) を取り付け、ドリル加工を行った。工具はMMC コベルコツール社製プリント基板用超硬ドリル (KUM100, 直径1mm) である。Fig.2-2に使用したドリルの主要寸法を、Table2-4に仕様を示す。実験においてはFig.2-3に示すように、通常のプリント基板の穴あけ時と同様にドリルの振れを抑え、入り口部のバリを防ぐために上部当て板としてアルミニウム板 (板厚0.2mm) を、ドリルの破損及び出口部のバリを防ぐために下部当て板としてベークライトを使用した。出口部で当て板無しでドリル加工を行った場合には、ドリルチゼルの推力で穴出口部の方向にガラス繊維がはく離することが知られているが、本加工では十分な当て板で保持することで、このようなはく離を防止してある点が特徴である。また、一層材は上部当て板と積層板の間に挟んで同時に加工した。これにより、積層板と一層材の切削状態は一致している。Table2-5に切削条件を示す。また、穴あけ実験は乾式加工で行い、加工回数の増加から工具摩耗によるデータへの影響を低減するために、工具は2～3回のならし加工を行った後に使用し、加工回数は50回を上限とした。

切削抵抗はドリル送り方向の力であるスラスト力に着目し、このスラスト力を測定し

た．測定方法はFig.3-1に示すように，キスラー社製圧電方動力計（TYPE 9373）の上部に取り付けた被削材をドリル加工し，動力計により得られる信号を同社製チャージアンプ（TYPE 439）を介してティアック社製データレコーダ（XR-7000）に取り込み測定した．上部当て板のアルミ板と下部当て板であるベークライトの間に被削材を挟んで加工を行った．加工穴の断面の観察には，日本電子社製走査型電子顕微鏡（SEM: Scanning Electron Microscope）JSM6400を使用した．

### 5-2-2 内部損傷の評価方法

一層材の内部損傷の観察にはニコン社製実体顕微鏡（SMZ-U）を使用し，画像処理は実体顕微鏡に日本ビクター社製CCD（Charge Coupled Device）カメラ（TK-1070）を取り付け，ピアス社製画像処理装置（PIAS- ）を使用した．

イオンマイグレーションは主にガラス繊維に沿って進行することが明らかになっている．加工穴の壁面から損傷の進行距離（損傷の深さ）が回路の信頼性確保のために重要である．また，Fig.2-14より，内部損傷は繊維方向に沿って進行していることが観察される．そこで，これまでの損傷幅の定義とは異なり，縦糸及び横糸方向の各ガラス繊維ごとに沿って損傷の外径までの距離をFig.5-1示すように測定し内部損傷と定義した．

### 5-2-3 領域の分類

ガラスクロスを強化繊維に使用したFRPの小径ドリル加工において，加工穴周辺に発生する損傷の発生度合いは，ばらつきが非常に大きい．特に小径ドリルを用いる場合，ガラスクロスの繊維束の幅に比べてドリル径が小さくなるに従って，その傾向が大きくなる．したがって，成形後のガラス繊維束の形状は重要な要因と考えられる．そこで，使用したGFRPの断面を切断・研磨して顕微鏡で成形後のガラスクロスの繊維束の幅と厚さ（Fig.5-7中のThickness of fiber bundle）を測定した．データ整理のため，繊維束の幅とドリル半径がほぼ等しい点を考慮して，Fig.5-2に示すようにガラスクロスに対し4つの領域（A-D）を設定した．そして加工穴中心（ドリルの中心）位置がどの領域内に存在するかでデータを分類し評価した．

各領域の特徴は，加工穴の中心が

領域Aの場合，縦糸・横糸の繊維束の切れ目

領域Bの場合，横糸の繊維束の中央であるが，縦糸の繊維束に対しては切れ目

領域Cの場合，横糸の繊維束に対しては切れ目であるが，縦糸の繊維束の中央

領域Dの場合，縦糸・横糸の繊維束の中央が重なる部分

に位置するものである．各領域に位置した時のドリル加工位置の状態をFig.5-3に示す．

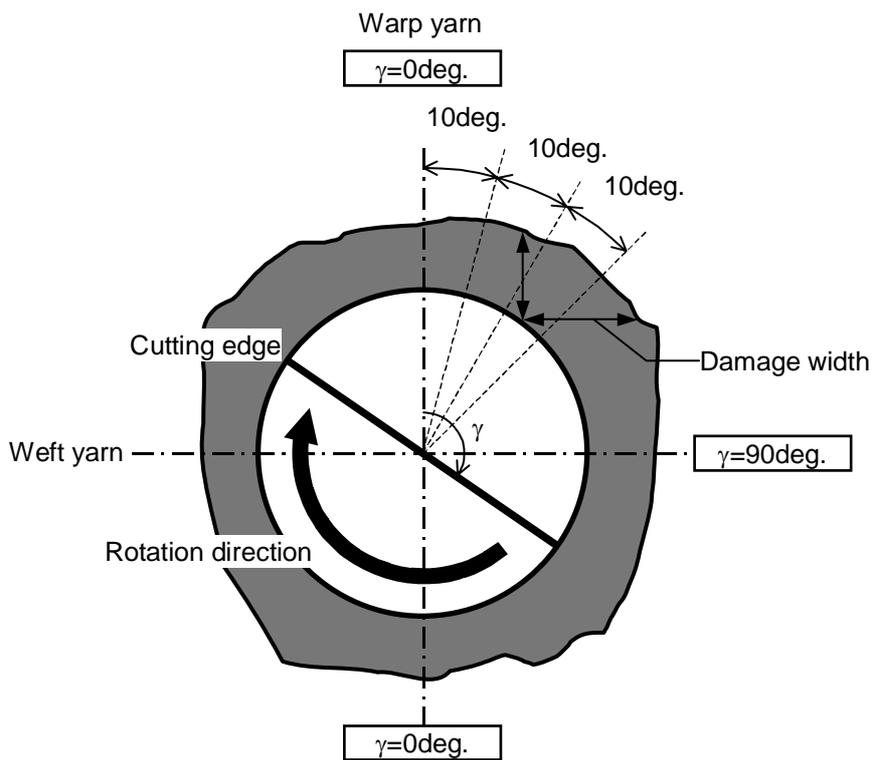


Fig.5-1 Definition of damage width.

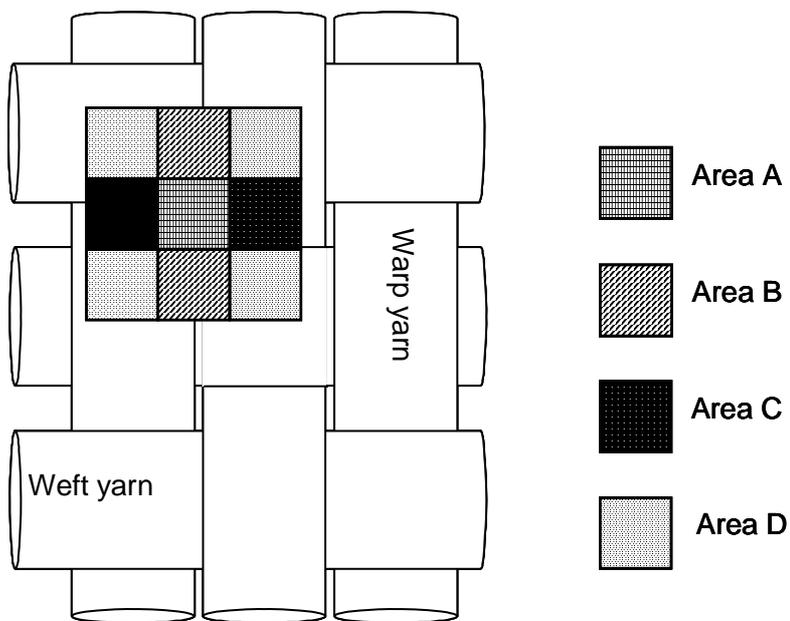


Fig.5-2 Definition of area (A-D).

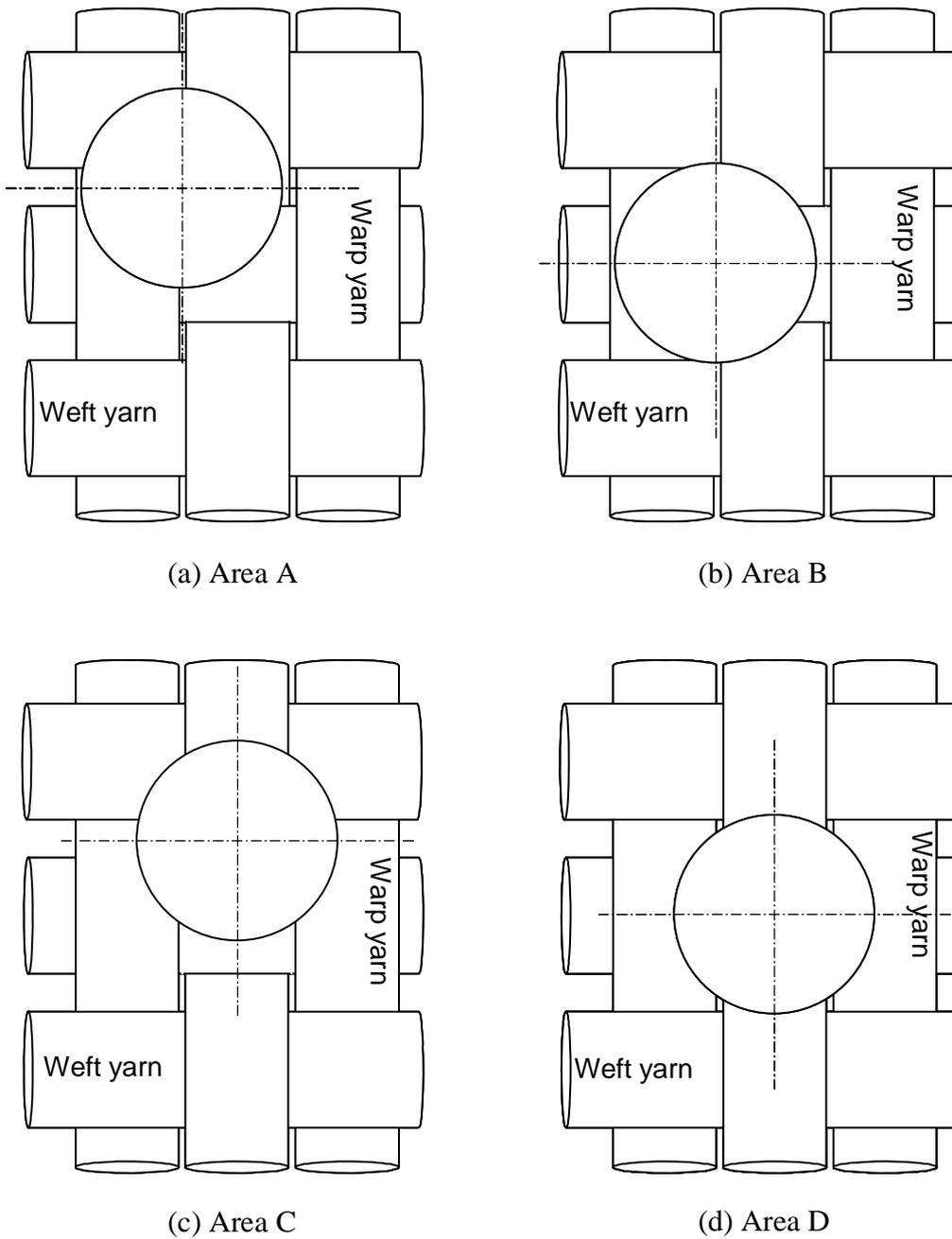


Fig.5-3 Hit position of drill.

### 5-3 実験結果及び考察

#### 5-3-1 加工穴壁面の表面状態

Fig.5-4はプリント基板積層板の加工穴断面のSEM写真である。また、図には回転角45deg. 付近のドリル送り方向に測定した表面粗さ曲線 (Fig.5-4中のE矢印位置) を合わせて示している。Fig.5-4(a)より回転角45deg. 付近の損傷が全体としては大きいですが、その大きさは積層によりかなり異なっている。積層板の上面より1, 3, 5, 7, 8層目は大きく掘り起されているが、2, 4, 6層目はその程度が小さい。さらに、Fig.5-4(b)の3層目に注目すると、第3章でも述べたように、一層のガラスクロス内で回転角45deg. 付近において逆目となる横系の繊維角45deg. 付近の繊維束が掘り起され、一方で順目である横系の繊維角135deg. 付近の繊維は比較的良好に切削されるため、ドリル送り方向の表面粗さは、それらの直交する繊維切削面の段差に影響されることも分かる。一方、4層目はどちらの繊維も比較的良好に切削されており段差が少ない。クロス材による強化材ではなく一方向材強化のFRPにおいては、表面粗さは繊維角が重要な要因である。しかし、クロス材を使用した積層板において、同一回転角でもガラスクロスの掘り起し発生規模は大きくばらつき、繊維角以外の要因としてガラスクロスとドリルの位置関係が影響していることが予想される。

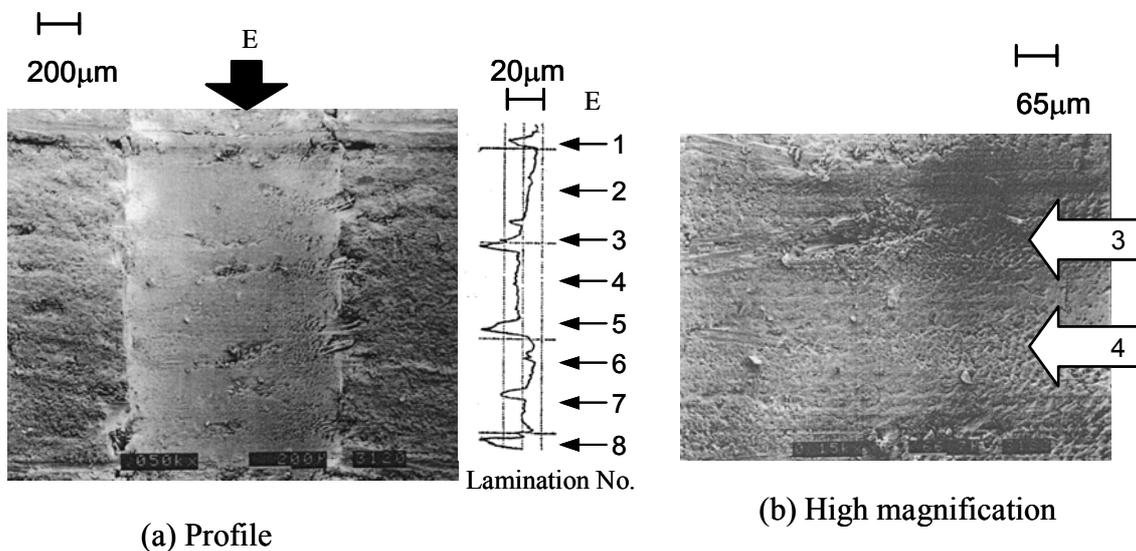


Fig.5-4 SEM micrographs and surface roughness of drilled holl wall.

#### 5-3-2 加工穴中心位置と損傷の関係

Fig.5-5(a), (b)は領域A及び領域Dにそれぞれ加工穴中心がある場合の一層材の顕微鏡写真である。Fig.5-5(a)より、加工穴中心が領域Aでは回転角30deg. ~ 60deg. 付近で黒色の内部損傷が発生しており、内部損傷の発生は1つの加工穴で4ヶ所悪化してい

ることが観察される．また，内部損傷は縦糸又は横糸の繊維束に沿って進行している．Fig.5-5(b)より加工穴中心が領域Dの場合，黒色の内部損傷は回転角0deg. 及び90deg. 付近で発生しており，Fig.5-5(a)同様に1つの加工穴で4ヶ所発生している．また，内部損傷は加工穴壁面から縦糸又は横糸に沿って進行しているのが観察される．Fig.5-5(a)と(b)を比較すると，内部損傷の大きく発生する回転角が異なることが分かり，また内部損傷の発生規模(黒色の領域)はFig.5-5(a)の方が大きいことが観察される．した

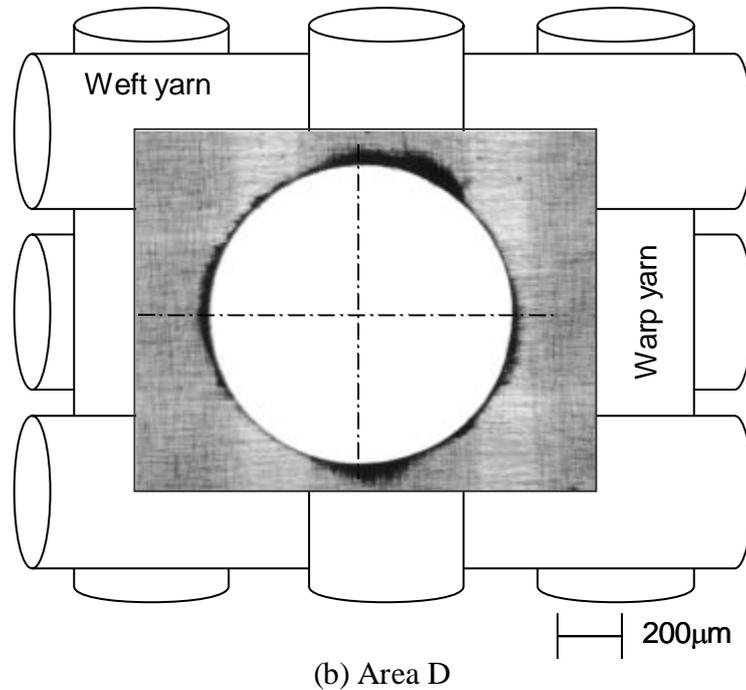
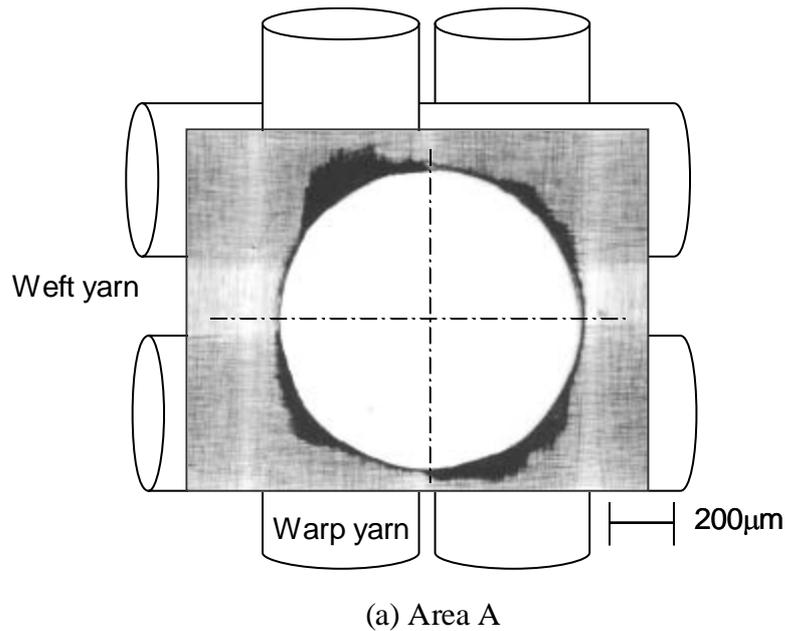


Fig.5-5 Micrographs of drilled lamina.

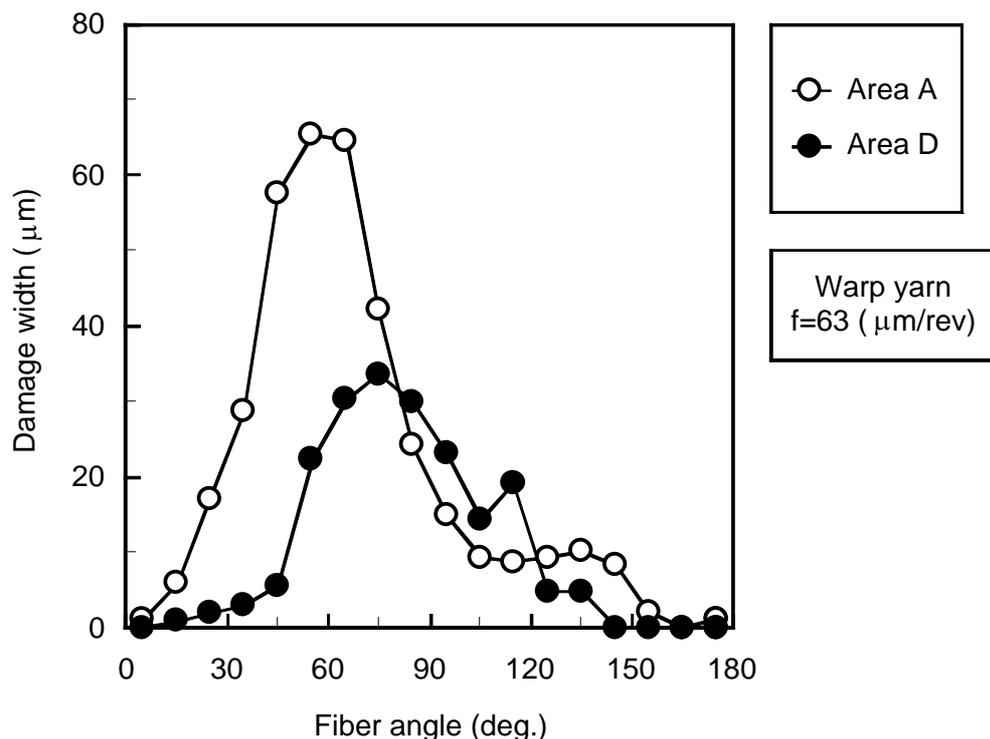


Fig.5-6 Relation between damage width and fiber angle.

がって、ガラスクロスに対する加工穴の中心位置の差により、加工穴の損傷の発生形態が著しく異なることが分かる。

Fig.5-6は多数のサンプルに穴あけ加工を行い、中心位置が領域A及び領域Dに存在する場合の縦糸方向の繊維角と損傷幅の関係である。Fig.5-6より、領域Aに中心がある場合、繊維角0deg. 付近から損傷幅は増加し繊維角45deg. 付近で極大値約70 $\mu$ mとなる。損傷幅は繊維角45deg. から減少し、繊維角160deg. 付近で0 $\mu$ mとなる。領域Dに中心がある場合には、損傷幅は繊維角0deg. 付近から増加し、繊維角90deg. 付近で極大値約35 $\mu$ mを示す。繊維角90deg. 以降損傷幅は減少し、繊維角150deg. 付近で約0 $\mu$ mとなる。領域Aでは損傷幅の極大値が繊維角45deg. 付近で、領域Dでは損傷幅の極大値は繊維角90deg. 付近で存在しており、損傷の発生形態が異なることが分かる。また、極大値の大きさも異なっており、領域Dに比べ領域Aの損傷幅が大きくなり加工穴品質が低下する。すなわち、ガラスクロスによる強化材では、一方向強化のFRPと異なり、損傷の発生規模は繊維角以外の要因として、加工穴中心位置にも影響を受けていることが分かる。

### 5-3-3 繊維束の厚さと繊維角

第3章の結果より、加工穴の最大粗さに対してはドリル条件として、送り量が大きく影響することが判明している。また、5-3-2項の結果より、領域Dに加工穴中心がある場合には、Fig.5-5(b)より、繊維角90deg. 付近で内部損傷が極大値を示すが、その付近

は繊維束の厚みが最も大きい場所でもある．そこで，加工穴壁面付近の繊維束の厚さと損傷の関係に着目した．評価方法は画像処理により加工穴中心位置を求め，その結果より各回転角ごとに加工穴壁面での繊維束厚さを算出した．各位置での繊維束厚さの計算は，Table5-1の繊維束の幅及び最大厚さの測定結果より，Fig.5-7に示すように繊維束断面形状を菱形（1次）に近似して行った．Fig.5-8(a),(b)は加工後の穴における繊維角45deg.及び90deg.位置での繊維束厚さと損傷幅の関係を領域別に示した結果である．Fig.5-8より，加工穴壁面の繊維束厚さが増大するほど，内部損傷も増大することが分かる．すなわち，繊維束厚さが加工穴の内部損傷に影響していることが判明した．

$t$  : Thickness of fiber bundle  
 $t_{max}$ : Maximum thickness of fiber bundle

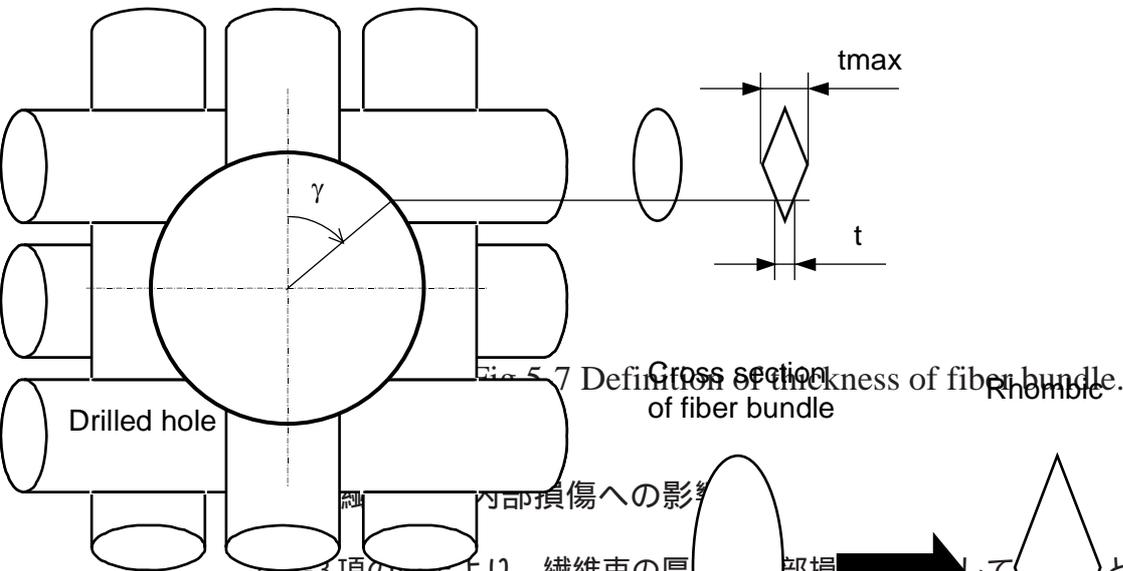
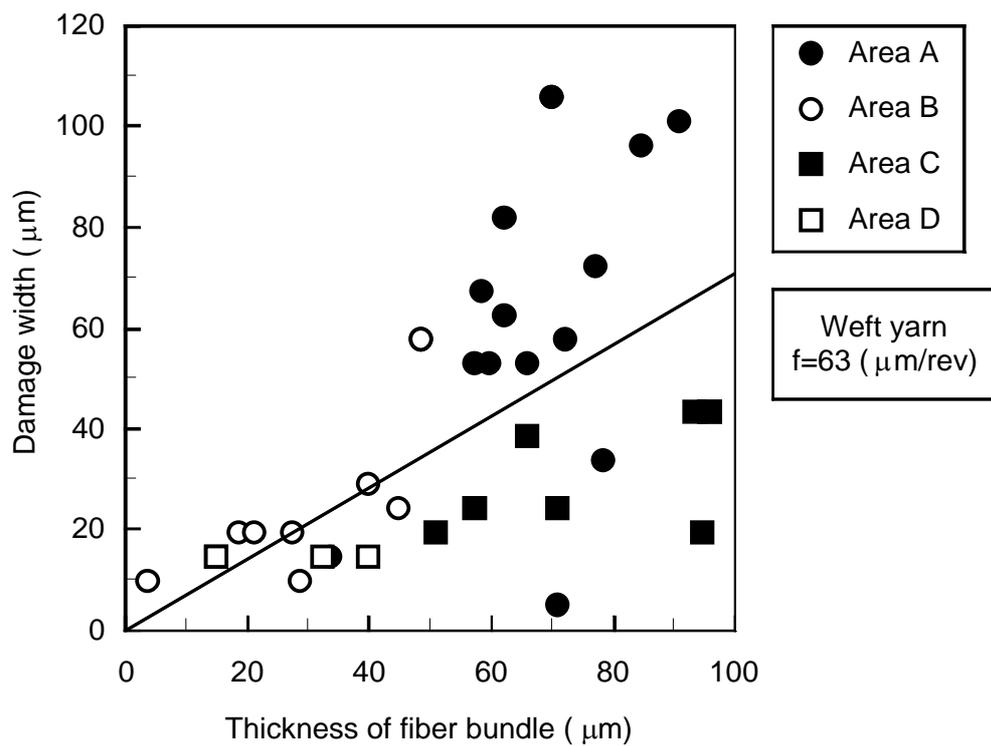
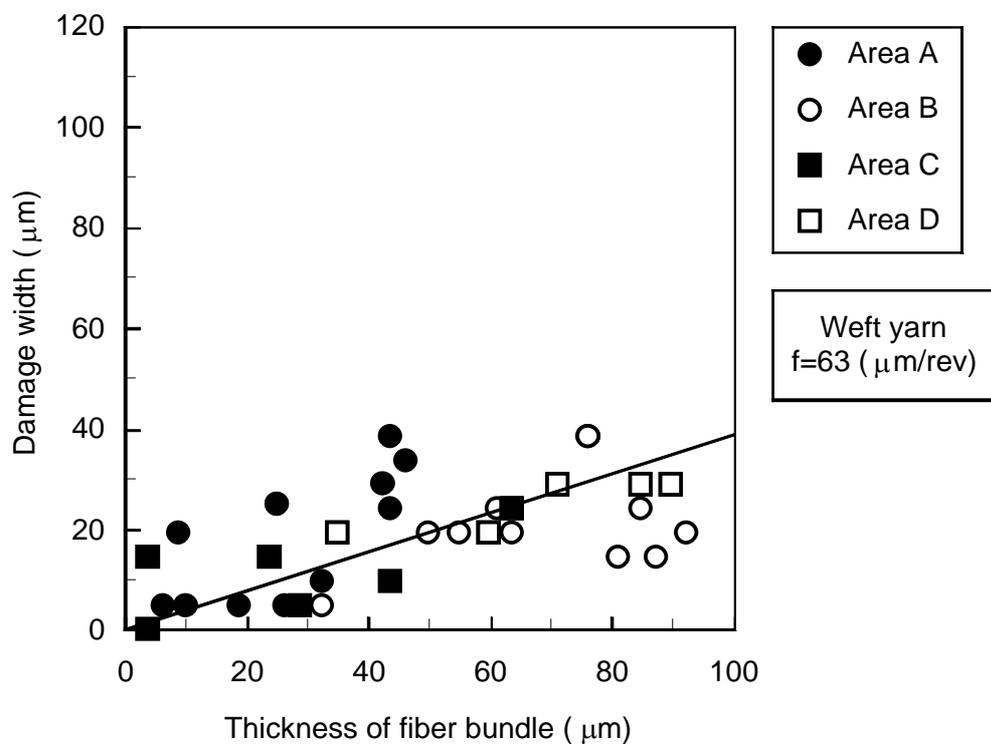


Fig.5-3項の結果より，繊維束の厚さが増大すると内部損傷への影響が増大することが判明した．しかし，Fig.5-8(a),(b)で加工穴壁面での繊維束の厚さと損傷幅の関係を示す近似直線の傾きが異なっている．これは繊維角の影響によると思われるため，本項では単位繊維束厚さ当たりの損傷幅（Fig.5-8中の直線の傾き）と繊維角の関係について考察する．Fig.5-9は単位繊維束厚さ当たりの損傷幅と繊維角の関係を示したものである．Fig.5-



(a)  $\gamma=45$  (deg.)



(b)  $\gamma=90$  (deg.)

Fig.5-8 Relation between damage width and thickness of fiber bundle.

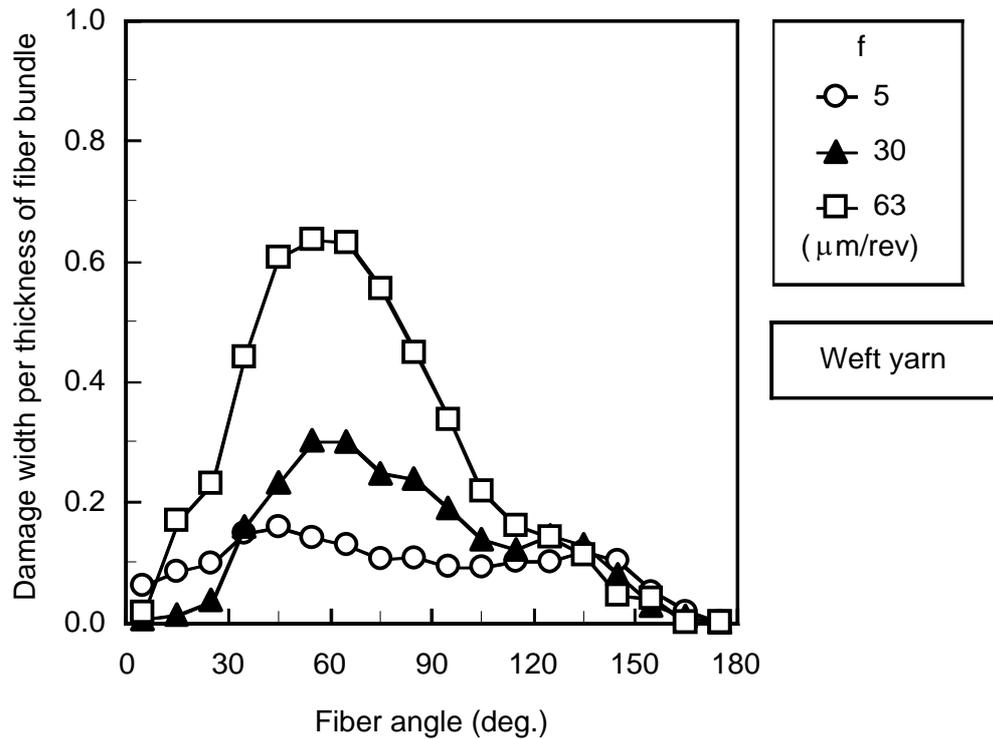


Fig.5-9 Relation between damage width per fiber thickness and fiber angle.

9より  $f=5\mu\text{m}/\text{rev}$  の時, 単位繊維束厚さ当たりの損傷幅は繊維角  $45\text{deg.}$  付近で他の繊維角のものとはやや大きくなる.  $f=30\mu\text{m}/\text{rev}$  の時, 単位繊維束厚さ当たりの損傷幅は繊維角  $30\text{deg.}$  から増加し, 繊維角  $60\text{deg.}$  付近で極大値約  $0.3$  を示し, 繊維角  $60\text{deg.}$  以降は減少する.  $f=63\mu\text{m}/\text{rev}$  の場合, 繊維角  $45\text{deg.} \sim 60\text{deg.}$  付近で単位繊維束厚さ当たりの損傷幅は極大値約  $0.7$  を示し, 繊維角  $60\text{deg.}$  以降は減少する傾向である. したがって, すべての送り条件で, 損傷幅が繊維角  $45\text{deg.} \sim 60\text{deg.}$  付近で極大値を示し, 送り量が増加するほど単位繊維束厚さ当たりの損傷幅は大きくなることが分かる. よってクロス材においても加工時に繊維束の厚みが同じならば, 繊維角  $45\text{deg.}$  付近で損傷幅は極大値となることが示された. また, 送り量が増大すると, 特に繊維角  $45\text{deg.}$  付近の単位繊維束厚さ当たりの損傷幅が大きくなり, 損傷幅に対する繊維角の影響が大きくなることも判明した.

### 5-3-5 加工穴中心位置と切削抵抗

加工時のスラスト力は表面粗さ等の損傷を評価する一指標と考えられる. そこでスラスト力の面から考察する.

Fig.5-10(a) ~ (c) は, 加工穴中心位置が領域 A, B, D にある場合のスラスト力の時間的変化である. まず切削開始から最大値を示すまでに注目する. Fig.5-10(a) 及び (c) を比

較すると、領域Aの場合に比べ領域Dの場合に最大値は大きな値を示している。この理由は、領域Dでは加工穴中心位置付近に繊維束が存在するため、加工初期にドリルチゼル部が繊維束を切削するため大きなスラスト力が発生するためである。一方、領域Aでは繊維束が加工穴中心付近に存在しないため、チゼル部は主に樹脂を切削し大きなスラスト力の増大を示さないものである。

次に、加工終了付近に着目する。まず全体として、平均値が小さな値を示している。この原因は使用したドリルの先端角が130deg. (Fig.2-2参照)であり、チゼル先端から外周切れ刃までの深さが約0.2mmと被削材の厚さと等しいためである。そのためドリルの外周の切れ刃が被削材に達するときには、チゼル部は被削材を貫通し始めており、スラスト力の平均値は小さくなるものである。よって、加工終了付近のデータは主にドリル外周の切れ刃(チゼル部以外)によるスラスト力を評価することになる。

領域Aの場合、変動成分の発生が観察されるが、領域Dの場合にスラスト力は小さな値のままである。領域Aの場合に発生しているスラスト力の変動の時間間隔はFig.5-10 (a)中のドリル1回転の時間(図中one rotation)と比較することによりドリル回転の

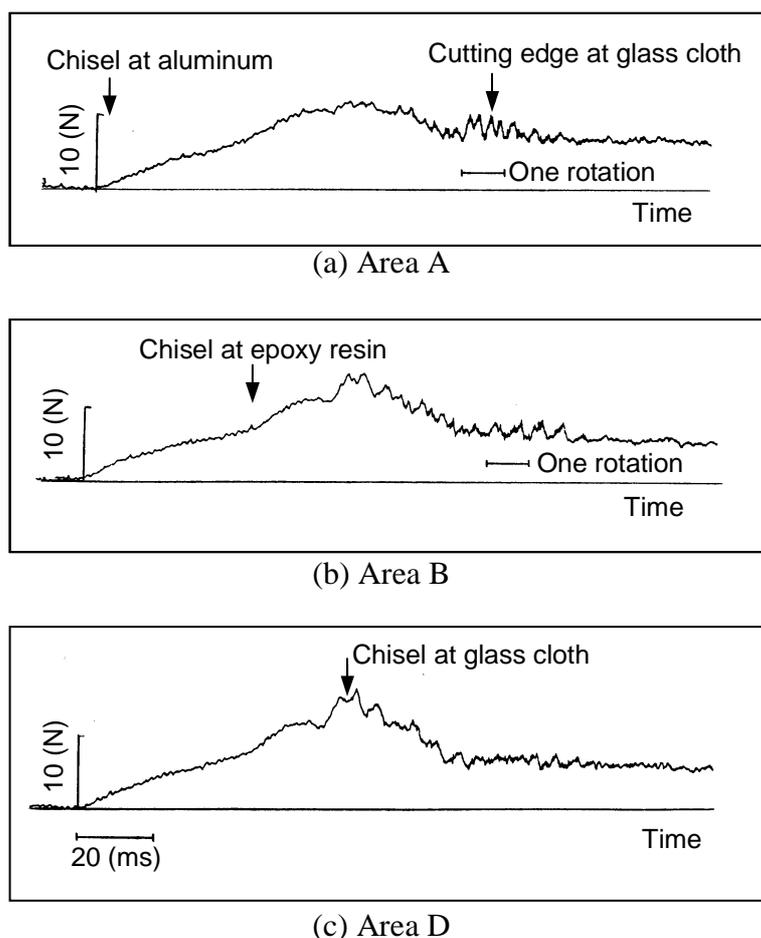


Fig.5-10 Measured thrust force of lamina ( $V=15.7$  m/min,  $f=63\mu\text{m/rev}$ ).

1/4周期（回転4次）と分かる．この理由として，王らが示している繊維角による比切削抵抗の違いが考えられる．すなわち，領域Aでは，繊維束が多く存在するのは回転角45deg. 付近であり，ドリル切れ刃が比切削抵抗の大きい角度で繊維を多く切削するとき大きな力が発生するものと考えられる．一方，領域Dでも回転角90deg. 付近で切れ刃は繊維束の厚い部分を切削するが，回転角の違いによる大きな力の発生はないことが分かる．領域B,Cはこれらの中間的な性質を有するため，加工開始付近のスラスト力の最大値は領域A及び領域Dの中間的な値を示し，さらに加工の終了付近の変動の時間間隔は回転の1/2周期（回転2次）となることも分かる．

以上の切削抵抗の測定結果からも，領域A及びDで，切削現象が大きく異なっていることが判明した．特に，領域Aに加工穴中心が存在する場合，切れ刃が回転角45deg. 付近で繊維束の厚い領域を切削するため，そのときの抵抗が大きくなり，回転4次成分を発生する特徴があることが分かった．

### 5-3-6 積層板における切削抵抗

積層板を加工する場合，加工時のスラスト力は各層でドリルチゼル部で発生する力と切れ刃部で発生する回転4次，回転2次等の力の組み合わせに次々と変化するものと考えられる．Fig.5-11は積層板を加工したときのスラスト力である．Fig.5-11より8層材であるため加工時に力が増大する8回の変動が存在することが分かる．しかし，積層間でその最大値の大きさにはかなりの差がみられる．この原因はドリルチゼル部がその層においてガラスクロスなどの領域に位置するかで変化するものと考えられる．さらに，ドリル回転の4次成分が顕著に発生する層(Fig.5-11中No.5)や，そのような成分が極めて少ない層(Fig.5-11中No.4)などの差も見られる．これらもドリルの中心が領域Aにある場合の切れ刃より回転4次成分が発生し，また領域Dにある切れ刃からは発生しないことに起因しているものと考えられる．すなわち，積層板において各積層でガラスクロスに対する加工穴中心の領域が異なるため，各積層間のスラスト力が大きく異なる特徴があることが示された．

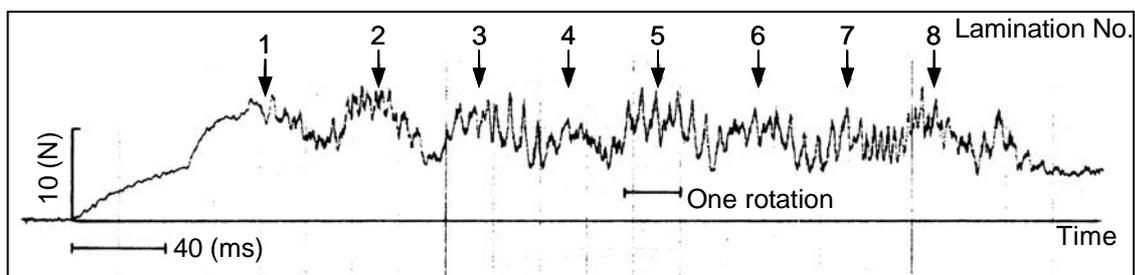


Fig.5-11 Measured thrust force of laminate ( $V=15.7$  m/min,  $f=63\mu\text{m}/\text{rev}$ ).

## 5-4 繊維束厚みの異なる材料による実験<sup>[20],[21]</sup>

前節までの結果より、加工穴周辺の損傷幅に影響する因子としてドリル切削方向と繊維の相対角（繊維角）、さらにガラスクロスに対する加工穴の相対位置関係が存在することが明らかになった。加工穴周辺の損傷幅を小さくするためには、加工穴壁面の繊維束の厚みが増大する箇所と繊維角45deg.の位置を一致させないこと、すなわち本材料に対しては、加工穴中心を領域Dにすることが有効であることが判明した。しかし、ガラスクロスに対する加工穴中心位置を考慮し、回路上にスルーホール位置を設定することは実用的に難しいと考えられる。さらに積層板を用いた場合、積層間でガラスクロスの位置をお互い正確に合わすことも難しい。すなわち、積層板においては同じ回転角の壁面でも、積層間で損傷状態が異なる。さらに、5-3-6項の結果からも積層間でガラスクロスの位置が異なるため、各層で切削現象が大きく異なることが示されている。一方、ガラスクロスに使用する繊維束厚さは実際のプリント基板材料の製作時に変更可能な要因と考えられる。そこで、繊維束厚さの異なる材料を穴あけ加工したときの内部損傷について考察する。

### 5-4-1 被削材及び実験装置

実験に使用した被削材のガラスクロスの名称は1080, 2116, 15, 7628, 220Gで、ガラス繊維はEガラスを使用している。ガラスクロス1080, 2116, 7628はIPC-EG-140の規格名称で、ガラスクロス15及び220Gは日東紡績(株)規格名称である。Table5-1にそれぞれのガラスクロスの繊維束厚さを、Table 2-1にEガラスの諸特性を、Table2-3にエポキシの諸特性を示す。

実験においてはFig.2-3に示すように、通常のプリント基板の穴あけ時と同様にドリルの振れを抑え、入り口部のバリを防ぐために上部当て板としてアルミニウム板（板厚0.2mm）を、ドリルの破損及び出口部のバリを防ぐために下部当て板としてベークライトを使用した。出口部で当て板無しでドリル加工を行った場合には、ドリルチゼルの推力で穴出口部の方向にガラス繊維がはく離することが知られているが、本加工では十分な当て板で保持することで、このようなはく離を防止してある点が特徴である。また、一層材は上部当て板と積層板の間に挟んで同時に加工した。これにより、積層板と一層材の切削状態は一致している。

一層材の内部損傷の観察にはニコン社製実体顕微鏡（SMZ-U）を使用し、画像処理は実体顕微鏡に日本ビクター社製CCD（Charge Coupled Device）カメラ（TK-1070）を取り付け、ピアス社製画像処理装置（PIAS- ）を使用した。使用したCCDカメラの有効画素数は768（水平）×493（垂直）である。一層材の内部損傷の評価には2-2-2項で説

Table 5-1 Properties of glass cloth.

| Material                  |           |         | 1080 | 2116 | 15   | 7628 | 220G |
|---------------------------|-----------|---------|------|------|------|------|------|
| Width of fiber bundle     | Warp yarn | a1 [mm] | 0.24 | 0.29 | 0.41 | 0.51 | 0.79 |
|                           | Weft yarn | a2 [mm] | 0.30 | 0.38 | 0.51 | 0.58 | 1.03 |
| Interval of fiber bundle  | Warp yarn | b1 [mm] | 0.18 | 0.14 | 0.08 | 0.04 | 0.46 |
|                           | Weft yarn | b2 [mm] | 0.24 | 0.09 | 0.05 | 0.19 | 0.27 |
| Thickness of fiber bundle | Warp yarn | t1 [μm] | 35   | 68   | 88   | 93   | 122  |
|                           | Weft yarn | t2 [μm] | 33   | 62   | 65   | 95   | 84   |

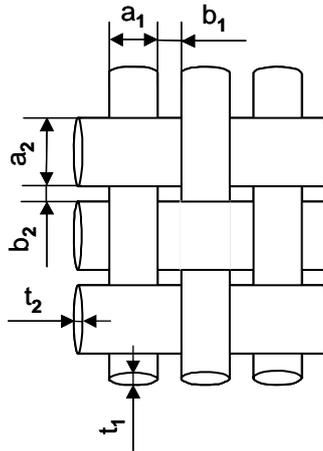


Table 5-2 Cutting condition.

| Diameter | Spindle speed | Cutting speed | Feed speed | Feed rate |
|----------|---------------|---------------|------------|-----------|
| D mm     | N rpm         | V m/min       | F mm/min   | f μm/rev  |
| 0.4      | 33,000        | 41.5          | 165        | 5         |
|          |               |               | 660        | 20        |
|          |               |               | 990        | 30        |
|          |               |               | 1485       | 45        |
|          |               |               | 1980       | 60        |

$$V = \frac{\pi DN}{1000}$$

$$f = \frac{F}{N} \times 10^3$$

明した画像処理システムを使用した。工具はMMC コベルコツール社製超硬PCBドリル KUL100で工具径は1.0mmと0.4mmである。ドリルによる穴あけは大隈豊和機械社製NCフライス盤FMR-40の主軸にNTN社製マイクロエアドリルスピンドルHB-RD47KU-02を取り付け、Table5-2に示す切削条件で行った。

#### 5-4-2 繊維束厚さの違いによる内部損傷への影響

繊維角45deg.では損傷は横糸方向に進展することからFig.5-12に試料の違いによる繊維角45deg.での繊維束厚さと横糸方向の損傷幅の関係を示す(送り量 $f=60\mu\text{m}/\text{rev}$ )。Fig.5-12より繊維束厚さの増加に伴い各試料の損傷幅は増加しており、また繊維束厚さが増加するほど発生する損傷幅の範囲が広くなりばらつくことが分かる。したがって切削部の繊維束厚さは損傷幅に影響を及ぼし、損傷幅はその繊維束厚さに対して一定の傾向で増加していると考えられる。また試料1080は他の4つの試料と比較して繊維束厚さの割にかなり値の大きいことが分かる。これは試料1080の繊維束厚さが薄く、ドリルが一回転する前に切削し終わっており他の試料とは損傷発生メカニズムが異なっているためと考えられる。

このバラツキの標準偏差を各試料の最大繊維束厚さ( $t_{\text{max}}$ )で割り加工試料毎に求めたものがFig.5-13である。Fig.5-13より、一番繊維束厚さの薄い試料1080も単位繊維束厚さ当りの標準偏差は一番大きな値となっている。つまり、試料1080は平均すると損傷の小さな試料であるが繊維束厚さが薄い割にはバラツキの非常に大きな試料である。よって繊維束厚さの薄い試料を穴あけ加工する際には送り量に十分注意しなければならないと言える。

#### 5-4-3 繊維束位置の違いによる内部損傷への影響

Fig.5-14は横軸に試料の違いによる繊維束の位置(菱形に近似した繊維束の端を0とし、繊維束の中央を1としている)を、縦軸に単位厚さ当たりの損傷幅をとり関係を示したものである(送り量 $60\mu\text{m}/\text{rev}$ 、繊維角75deg.)。Fig.5-12より繊維束厚さの厚い部分ほど損傷幅は大きくなることが分かったがFig.5-14より単位厚さ当たりで考えれば、繊維束の厚い中央付近の損傷幅は小さく、繊維束の薄い端に近づくほど損傷幅は大きくなっている。また試料1080は大きな値を示しており、単位厚さ当たりで考えると一番損傷の大きく出ていることが分かる。つまり繊維束厚さの厚い試料でも繊維束の薄い端付近になると単位厚さ当たりの損傷幅は大きくなることになり、繊維束厚さが薄すぎる試料を用いても、単位厚さ当たりの損傷幅は大きくなることが分かった。

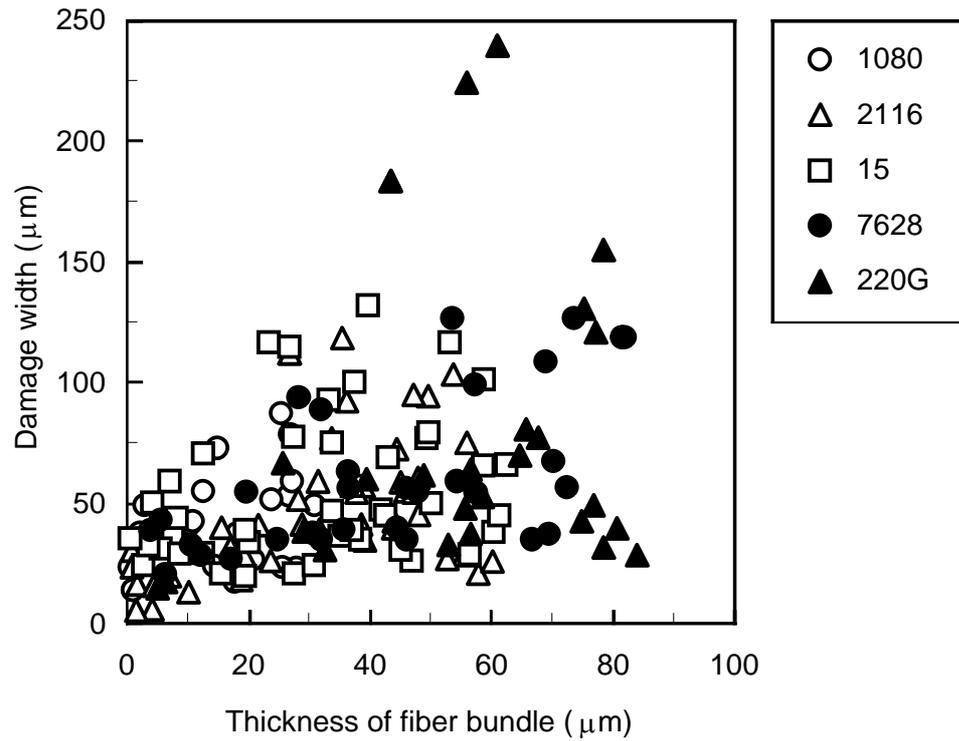


Fig.5-12 Relation between damage width and thickness of fiber bundle.

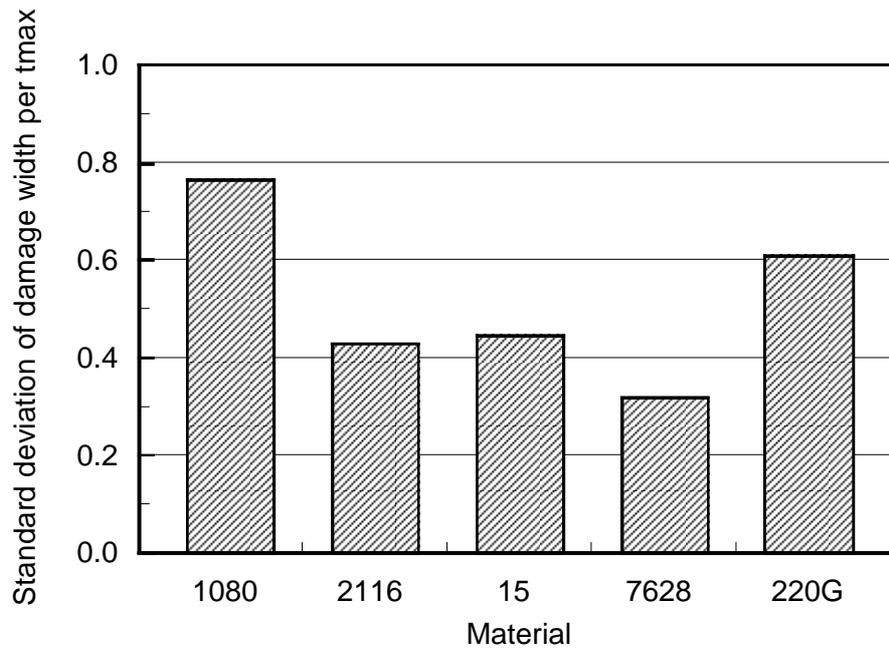


Fig.5-13 Relation between standard deviation of damage width per tmax and material.

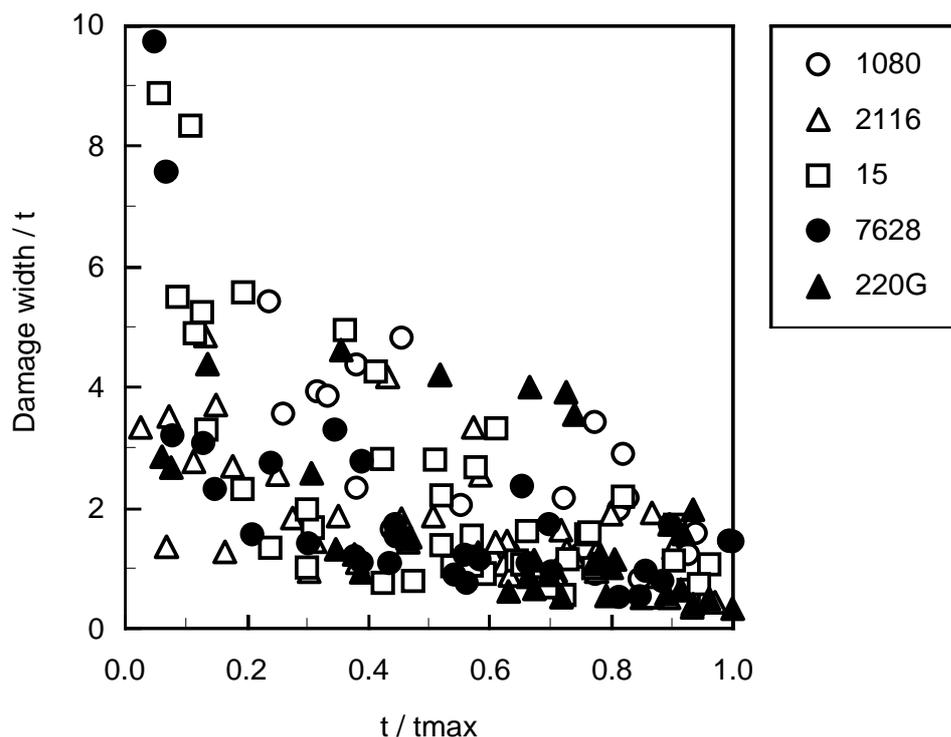


Fig.5-14 Relation between damage width/t and t/tmax.

5-4-4 単位送り量当たりの繊維束厚さが内部損傷に及ぼす影響

Fig.5-15は5種類の被削材の全てに対して、横軸に壁面の繊維束厚さ(t)と送り量(f)との比(繊維束の切削回数)を縦軸に損傷幅をとり関係を求めたものである(繊維角45deg.)。また、各送り量別に近似直線を示している。Fig.5-15より壁面の繊維束厚さが送り量と同じくらいかそれよりも小さい範囲、すなわち1付近及び1以下の部分では損傷幅はかなり大きくなるのが分かる。またこれまでの実験より壁面の繊維束厚さの増加に伴い損傷幅は増加し、繊維束の端付近の厚さが薄い所では単位厚さ当たりの損傷幅は大きくなるのが分かっている。ここで被削材の繊維束厚さを大きくしても端付近の厚さは送り量の大きさより小さくなることは避けられない。一方、繊維束端付近の単位厚さ当たりの損傷幅が大きくなるが、損傷幅で比較すると中央付近よりも小さくなる。よって損傷が最も大きくなる中央付近の繊維束厚さを小さい材料が損傷幅の低減に有効となる。ただし被削材の最大繊維束厚さが送り量に比べ薄いと、単位厚さ当たりのバラツキが大きくなり、大きな損傷の発生する確率が高くなる。よって最大繊維束厚さを送り量よりもある程度大きくしておくことが最適であると言える。また、切削回数1以下の損傷幅に関しては、ドリルが1回転する前に繊維束の切削が完了していることになるので、繊維束をドリル1回転以上で切削する場合の損傷幅の発生するメカニズムとは異なり、損傷幅のばらつきも大きくなると考えられる。

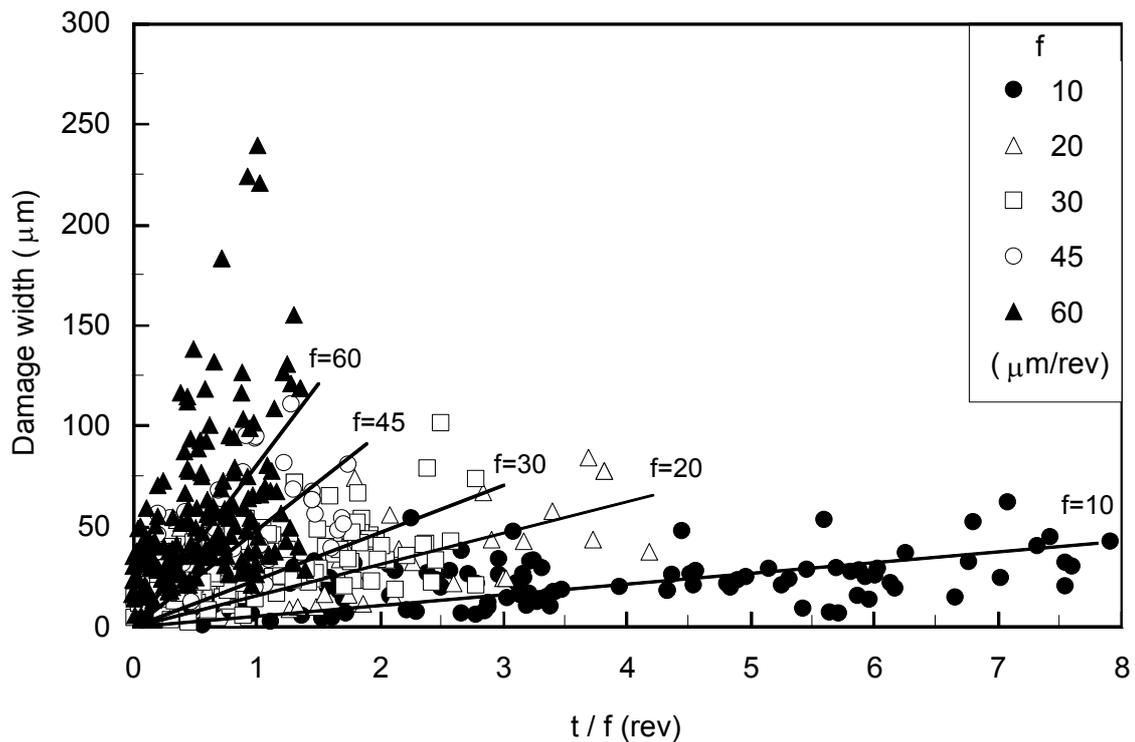


Fig.5-15 Relation between damage width and t/f.

#### 5-4-5 送り量と一回転当たりの損傷幅の関係

Fig.5-16は横軸に送り量を、縦軸に一回転当たりの損傷幅(Fig.5-15において送り量毎に近似直線を引いた際の傾き)を示し、縦軸及び横軸に対して常用対数をとって関係を求めたものである(繊維角45deg.)。Fig.5-16より送り量と一回転当たりの損傷幅の大きさには関係のある事が分る。近似曲線を引くと各点はほぼ直線上にのり、実験を行った送り量以外にも一回転当たりの損傷幅を予測することができる。近似曲線の数式を以下に示す。

ここで、Dwは損傷幅、tは繊維束厚さ、fは送り量とする。

$$\log_{10} \left( \frac{Dw}{t/f} \right) = 1.500 \log_{10} f - 0.787 \log_{10} 10$$

$$\frac{Dw}{t/f} = 0.164 \times f^{1.5}$$

$$\therefore Dw = 0.164 \times t \times f^{0.5}$$

この式より、送り量f及び被削材の繊維束厚さtが決定すれば、繊維角45deg.での損傷幅Dwが予測可能であり、様々な繊維束厚さのガラスクロスの材料に適用可能であると考

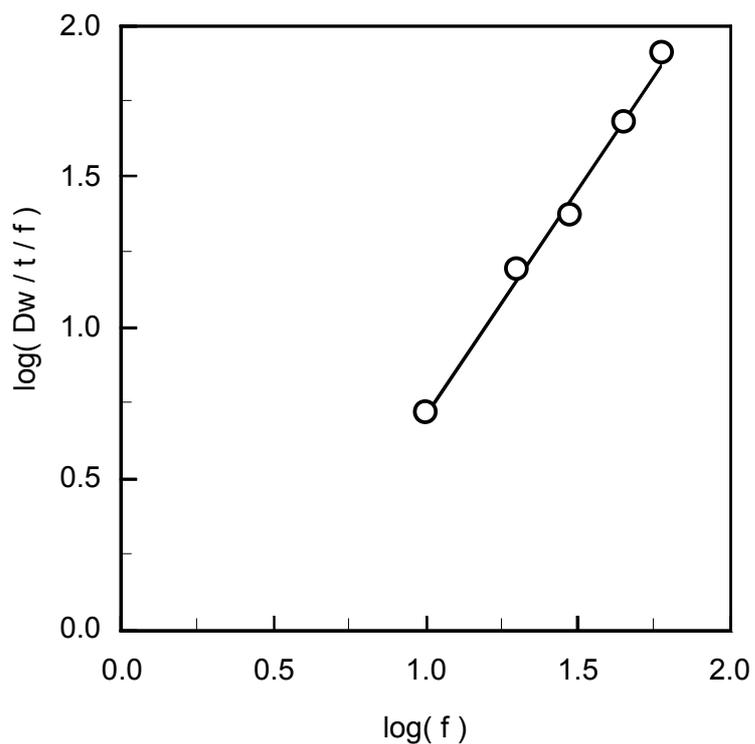


Fig.5-16 Relation between damage width per revolution and feed rate.

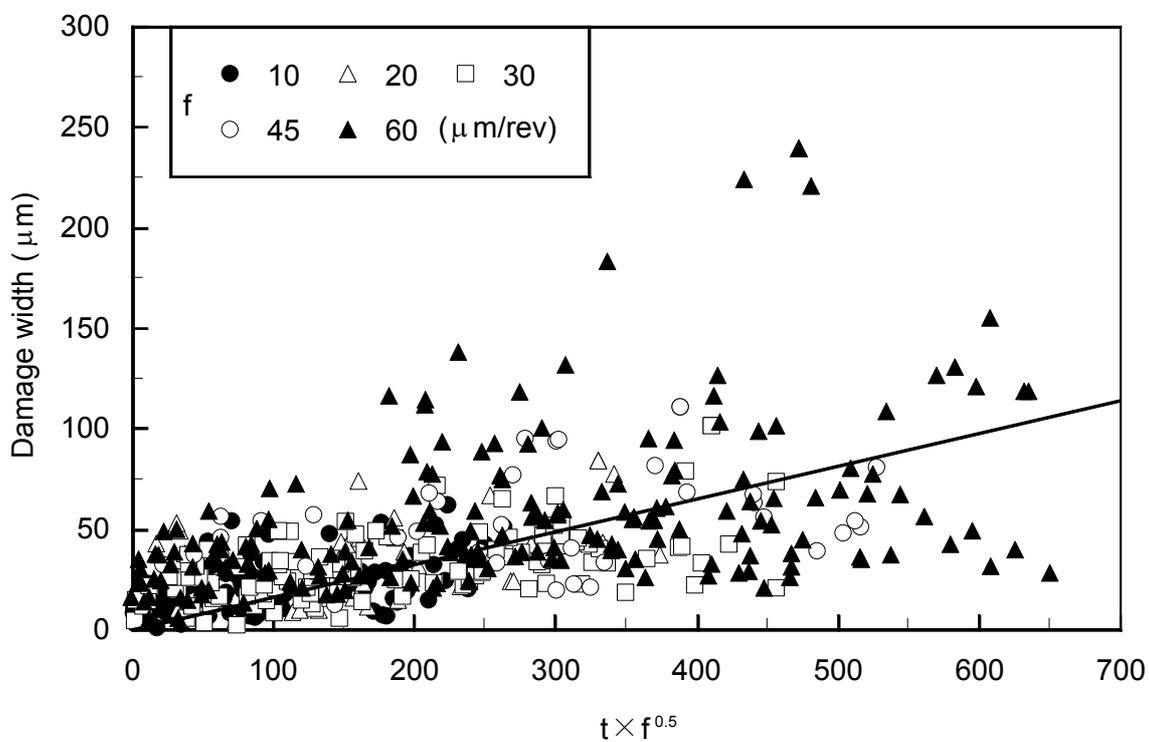


Fig.5-17 Relation between damage width and  $t \times f^{0.5}$ .

えられる。また  $D_w$  は  $t \times f^{0.5}$  に強く影響されることから、Fig.5-15のデータを縦軸に損傷幅、横軸に  $t \times f^{0.5}$  をとった時の関係を Fig.5-17 に示す。Fig.5-17 には、上で求めた近似直線も示している。Fig.5-17 より送り量の大きい  $f=60\mu\text{m}/\text{rev}$  の損傷幅以外は、多少ばらつきがあるがほぼ近似直線に従っており、上で求めた近似式は損傷幅を予測可能となる。したがって、この近似式より材料に対する最適な切削条件の設定や、プリント基板に適した材料開発が可能となると考えられる。ただし、送り量  $f=60\mu\text{m}/\text{rev}$  の損傷幅のばらつきについては、Fig.5-15での繊維束の切削回数を求める際に小数点以下を考慮しているが、少数点以下の値の処理方法で変化してくると考えられる。また、送り量が大きくなるとドリル1回転以内で繊維束の切削が完了してしまうため、損傷幅のばらつきが大きくなると考えられる。材料の面から考えると、ガラス繊維束がクロスしているため、損傷を受ける繊維（繊維角  $45\text{deg.}$ ）が損傷を受けない繊維（繊維角  $135\text{deg.}$ ）の上部あるいは下部に位置するかも損傷幅はばらつき、また次章で考察するドリル加工中の切り残し繊維の影響もあると考えられる。

## 5-5 結 言

ガラスクロス基材エポキシ樹脂積層板の小径ドリル加工穴において、イオンマイグレーションの原因となるガラス繊維束内での内部損傷を評価した結果、以下の結論を得た。

- (1) 繊維束厚さが加工穴の内部損傷に影響し、繊維角が同じならば、加工穴壁面の繊維束厚さが増大している箇所でも内部損傷が増大する。
- (2) 加工穴壁面で繊維束厚さが同じならば、繊維角  $45\text{deg.}$  付近で内部損傷は極大値を示し、その傾向は加工時の送り量が大きいほど顕著である。
- (3) 領域 A に加工穴中心が存在する場合、切れ刃が回転角  $45\text{deg.}$  において比切削抵抗が大きな繊維角で繊維束の厚い領域を切削するため、そのときの抵抗が大きくなり、回転4次成分を発生する特徴がある。
- (4) 繊維束厚みが大きいガラスクロスによって強化された材料では、加工時に内部損傷が大きく進展する可能性が高いことが判明した。また、内部損傷の低減には送り量を最大繊維束厚さよりも小さくすることが有効である。
- (5) 損傷幅は繊維を切断する回数に比例し、送り量の  $1/2$  乗に比例することが分かり、この知見により材料に対する最適な切削条件の設定や、プリント基板に適した材料開発が可能となる。

---

## 第6章

### 切れ刃形状と損傷メカニズム<sup>[4],[16],[18]</sup>

---

前章では、ガラスクロスとドリル中心の相対位置及びガラス繊維束の厚さに着目しドリル中心位置の違いにより内部損傷の発生形態が異なることを示し、内部損傷の発生形態のばらつきの原因を解明した。しかし、工具形状には触れておらず、内部損傷に影響を及ぼす工具の部位を解明する必要がある。そこで本章では、工具による内部損傷の発生メカニズムを解明するために、切削抵抗を時間的に詳細に調べ、内部損傷との因果関係を検討する。さらに、工具形状を変化させて内部損傷への影響を明らかにする。

#### 6-1 緒言

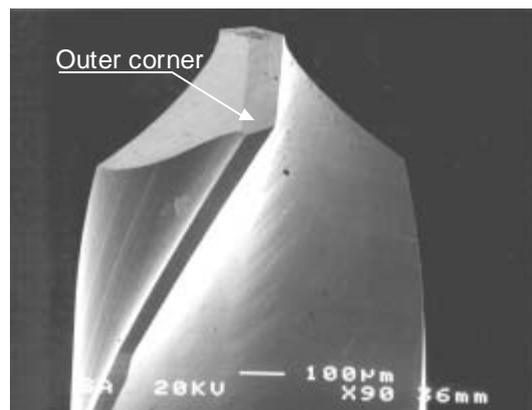
第5章では、GFRPのガラスクロスとドリル中心位置との相対関係に注目し、第2章でも指摘した内部損傷の発生形態のばらつきに対する原因を解明した。第3章及び第4章ではGFRPのドリル加工時に発生する損傷について材料側からの考察を行っており、工具形状については触れていない。ドリル加工はレーザー加工とは異なり接触加工であるため、工具形状が損傷に及ぼす影響があると考えられ、損傷を低減するためには工具形状を考慮する必要がある。これまでのGFRPのドリル加工の研究で、SHIN-CHIEH LINら<sup>[141]</sup>はツイストドリルとロウソク型ドリルで摩耗実験を行い、スラスト力及びトルクの変化を測定しそれぞれの工具の特性を加工壁面の観察を交えて考察している。G.R.Bishopら<sup>[144]</sup>はツイストドリルの先端角を変化させてスラスト力及びトルクへの影響を調査している。しかし、いずれの実験もドリル径が小径でなく、また工具形状と損傷との関係を解明するまでに至っていない。また、S.Abrateら<sup>[145]</sup>やS.Jain<sup>[148]</sup>らは下部当て板無しでドリル加工を行った場合、ドリルチゼル部の推力により加工穴出口部でガラス繊維のはく離が発生するメカニズムを述べているが、実際の加工では十分な下部当て板を使用しており、このようなはく離を防止している。したがって、プリント基板のドリル加工ではドリルチゼル部の推力による加工穴出口部でのガラス繊維のはく離発生メカニズムは当

ではまらないと考えられる。

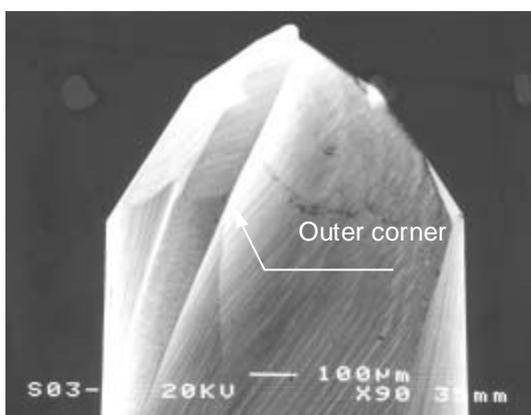
そこで本章では、まず従来のドリルによるスラスト力を時間的に詳細に調べ、内部損傷の発生形態との相関関係を調べる。次に、スラスト力のばらつきを解明するためにドリル加工時のガラス繊維とエポキシ樹脂の積層構成に着眼し、損傷を受ける繊維が樹脂の上部及び下部にある場合の損傷の深さについて有限要素法を用いて考察する。さらに、加工壁面を最終的に形成する工具の箇所を特定し、その形状がスラスト力及び内部損傷に及ぼす影響について調査する。

## 6-2 実験装置及び方法

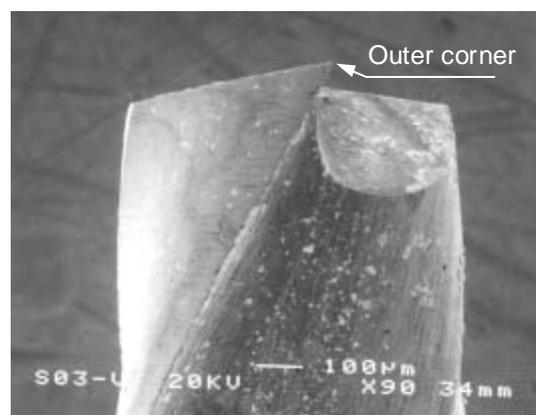
実験に使用した被削材は、ガラスクロス基材エポキシ樹脂板で最も多用されている JIS-GE4F とした。ガラスクロスは 7628 (IPC-EG-140 の規格名称) で、ガラス繊維は E ガラスを使用している。板厚 1.6mm (ガラスクロス積層数 8 層) の積層板と板厚 0.2mm (ガ



(a) Drill (TYPE A)



(b) Bowl end mill (TYPE B)



(c) Square end mill (TYPE C)

Fig.6-1 SEM micrograph of tool.

ラスクロス積層数1層)の一層材を用いた。Table 2-1にEガラスの諸特性を、Table2-2にガラスクロスの諸特性を、Table2-3にエポキシの諸特性を示す。

穴あけは遠州工業社製立フライス盤 (TYPE ENSHU-V1) の主軸に日本精密工作社製のハイスピンドルモーター (HS-220) を取り付けてドリル加工を行った。工具はMMCコベルコツール社製プリント基板用超硬ドリル (KUM100, 直径1mm, 以下TYPE A) である。Fig.2-2に使用したドリルの主要寸法を、Table2-4に仕様を示す。実験においてはFig.2-3に示すように、通常のプリント基板の穴あけ時と同様にドリルの振れを抑え、入り口部のバリを防ぐために上部当て板としてアルミニウム板 (板厚0.2mm) を、ドリルの破損及び出口部のバリを防ぐために下部当て板としてベークライトを使用した。出口部で当て板無しでドリル加工を行った場合には、ドリルチゼルの推力で穴出口部の方向にガラス繊維がはく離することが知られているが、本加工では十分な当て板で保持することで、このようなはく離を防止してある点が特徴である。また、一層材は上部当て板と積層板の間に挟んで同時に加工した。これにより、積層板と一層材の切削状態は一致している。Table2-5に切削条件を示す。また、穴あけ実験は乾式加工で行い、加工回数の増加から工具摩耗によるデータへの影響を低減するために、工具は2~3回のならし加工を行った後に使用し、加工回数は50回を上限とした。

切削抵抗はドリル送り方向の力であるスラスト力に着目し、このスラスト力を測定した。測定方法はFig. 3-1に示すように、キスラー社製圧電方動力計 (TYPE 9373) の上部に取り付けた被削材を穴あけし、動力計により得られる信号を同社製チャージアンプ (TYPE 439) を介してティアック社製データレコーダ (XR-7000) に取り込み測定した。スラスト力のデータ処理には小野測器社製のFFT (Fast Fourier Transform) アナライザー (CF-350) を使用した。

工具先端形状の違いによる比較実験のために、日進工具社製の直径1mmボールエンドミルDHB R0.5 (以下TYPE B)、日立ツール社製の直径1mmスクエアエンドミル2ESMR1 (以下TYPE C) も使用した。内部損傷の評価にはGFRP一層材を、切削抵抗の測定には積層板を使用した。Fig.6-1に工具のSEM写真を示す。

## 6-3 実験結果及び考察

### 6-3-1 一層材の内部損傷の評価

Fig.6-2は穴あけ加工した一層材の透過光写真と損傷幅と回転角の関係を示したものである。Fig.6-2の顕微鏡写真より加工穴周辺に発生した黒色の内部損傷は、4箇所大きく発生することが観察される。この内部損傷は、加工穴周辺のガラス繊維の掘り起しや、ガラス繊維とエポキシ樹脂とのはく離等の損傷により発生する。Fig.6-2の損傷幅

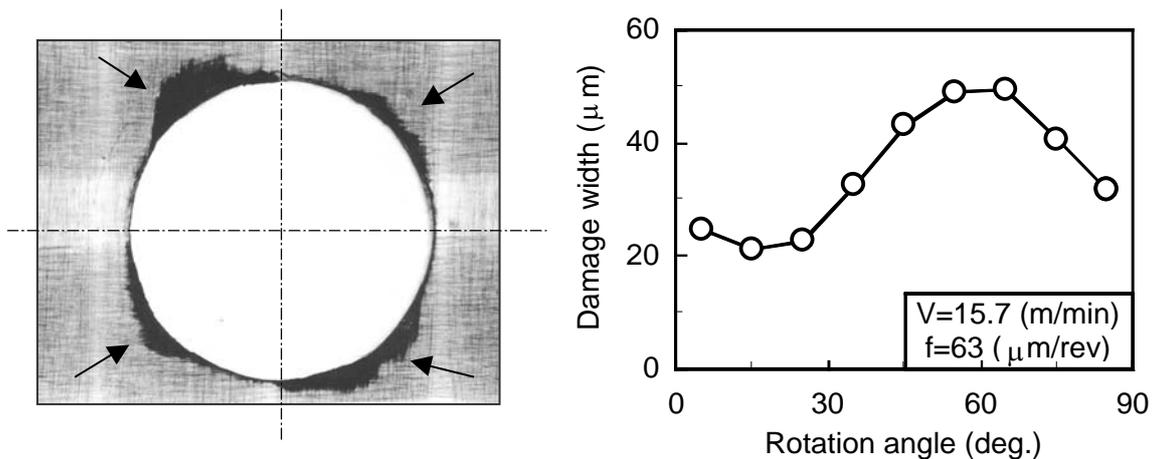


Fig.6-2 Relation between damage width and rotation angle.

と回転角の関係のグラフにおいて、回転角 0deg. ~ 30deg. の範囲では損傷幅は約 25 $\mu\text{m}$  であり、回転角が 45deg. ~ 60deg. では損傷幅は約 50 $\mu\text{m}$  となり極大値となることがわかる。すなわち、回転角 0deg. ~ 90deg. の範囲で損傷幅の極大値が 1 つ存在することから、1 つの加工穴は 4 つの損傷幅の極大値をとり、この現象がクロス材のドリル加工の特徴の一つと言える。

### 6-3-2 積層板のドリル加工時のスラスト曲線

Fig.3-9のA部を拡大したものをFig.6-3に示し、ドリル切れ刃の位置(回転角)を併記する。Fig.6-3よりガラス布の切削時には、スラスト力はドリル1回転当たり4つの極大値を持つことが分かる。すなわち1回転で4回変動する成分が存在しており、この変動成分はドリル切れ刃が回転角45deg. ~ 60deg. 付近となる箇所極大値をとる。Fig.6-4はFig.6-3のスラスト力をFFTアナライザーにより周波数解析した結果である。Fig.6-4より333Hzでスラスト力は極大値をとる。回転数は5000rpmであることからドリルの回転周波数は約83.3Hzとなる。また、Fig.6-3よりドリル1回転あたり4回変動することからこの変動成分の周波数は $83.3 \times 4 = 333\text{Hz}$ である。そこで、変動成分の極大値と極小値の差の1/2を回転4次成分[一般に回転n次成分とは基準とする回転体(この場合ドリル)の1回転についてn周期を完了する成分を回転n次成分としている]と定義する。回転4次成分はスラスト力をサンプリング時間を0.01sとしてFFTアナライザーにより周波数スペクトルを求めた際の周波数333Hzの振幅値を調べた。

Fig.6-3の結果はFig.6-2の結果と一致しており、内部損傷は回転4次成分と密接な関係があり、内部損傷が発生した時に回転4次成分が存在すると考えられる。そこで次項で、内部損傷と回転4次成分の関係を詳細に調べた。

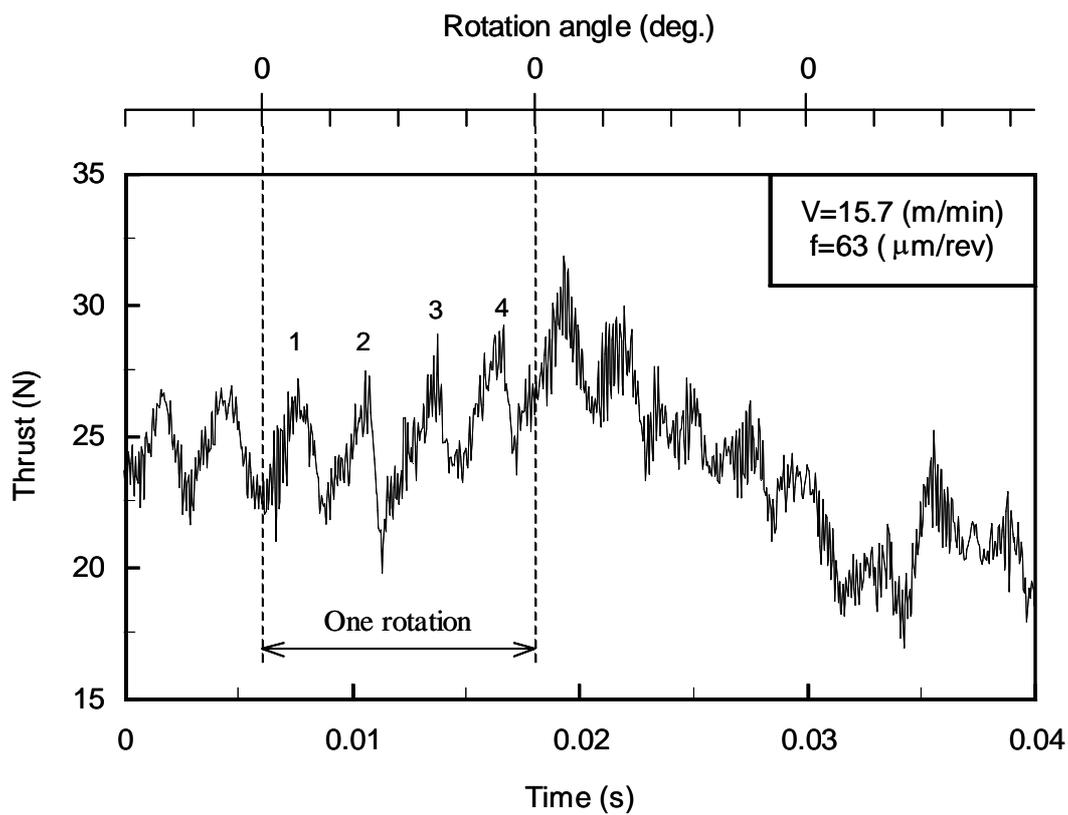


Fig.6-3 Enlarged view of thrust force.

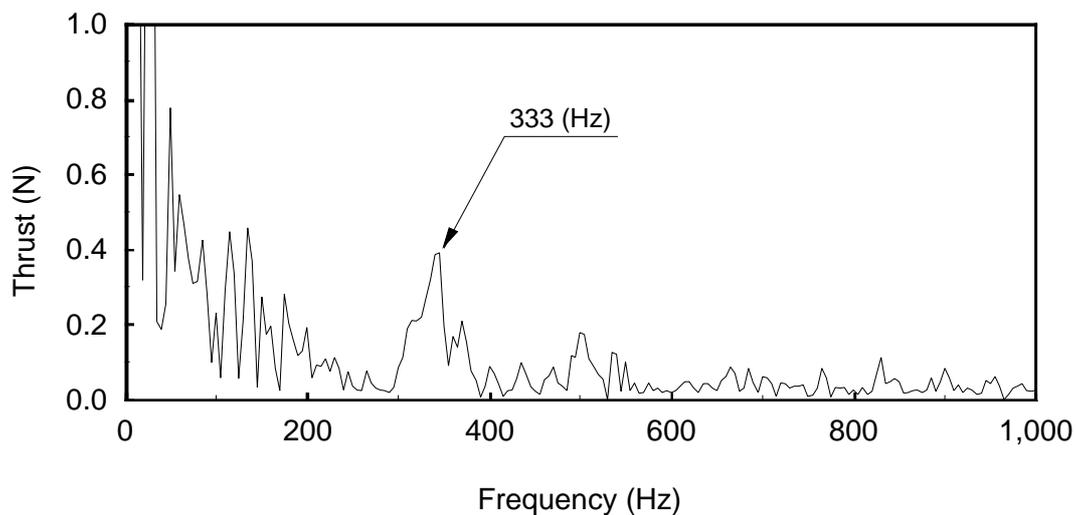


Fig.6-4 Frequency analytical result of thrust.

## 6-3-3 回転4次成分と内部損傷の関係

積層板をドリル加工した際 (Fig.3-9 中) の回転4次成分 (極大値と極小値の差の1/2) の時間的変化を調べた結果を Fig.6-5 に示す。また、図の横軸には、ドリル肩部の試験片内の位置を併記する。ドリル肩部の位置の軸で、は樹脂リッチ部、は繊維リッチ部を位置していることを示している。Fig.6-5より、ドリル肩部がアルミ板や樹脂リッチ部にあるときには回転4次成分の値は小さいが、繊維リッチ部に到達するときに、回転4次成分が増大することが分かる。ドリル先端から肩部までの軸方向の距離は約0.2mmであり、積層板の板厚が1.6mm、積層数が8層であることから1層当たり約0.2mmとなる。このことから、切れ刃部は加工中は常にガラス繊維と樹脂を加工していることになる。肩部が樹脂リッチ部に位置していても回転4次成分が0にならないのは、肩部以外の切れ刃によっても回転4次成分が発生するためと考えられる。しかし、肩部が繊維リッチ部に到達した時に回転4次成分が増大することから、ドリル切れ刃よりも肩部が回転4次成分に大きく影響し、肩部が回転4次成分の発生の主要因であると考えられる。また、Fig.3-9,6-5より、各層をドリルが加工していく際に、回転4次成分にばらつ

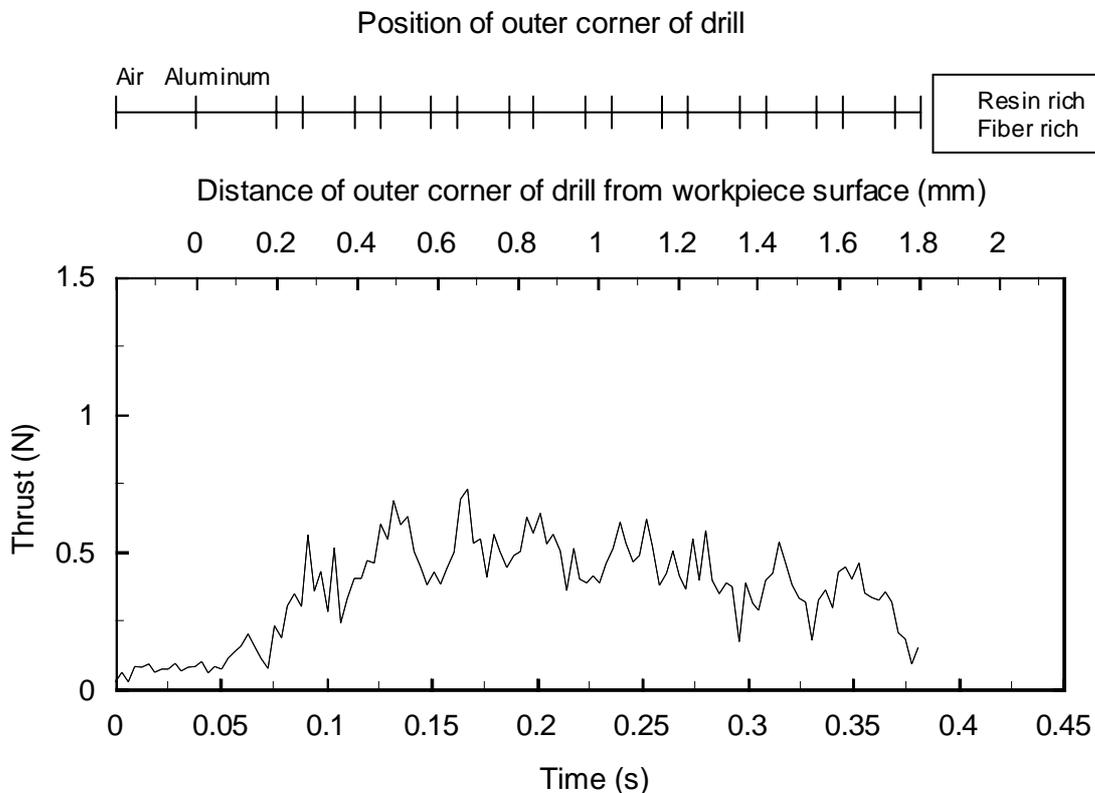


Fig.6-5 Amplitude of 4th harmonic component of rotation (TYPE A).

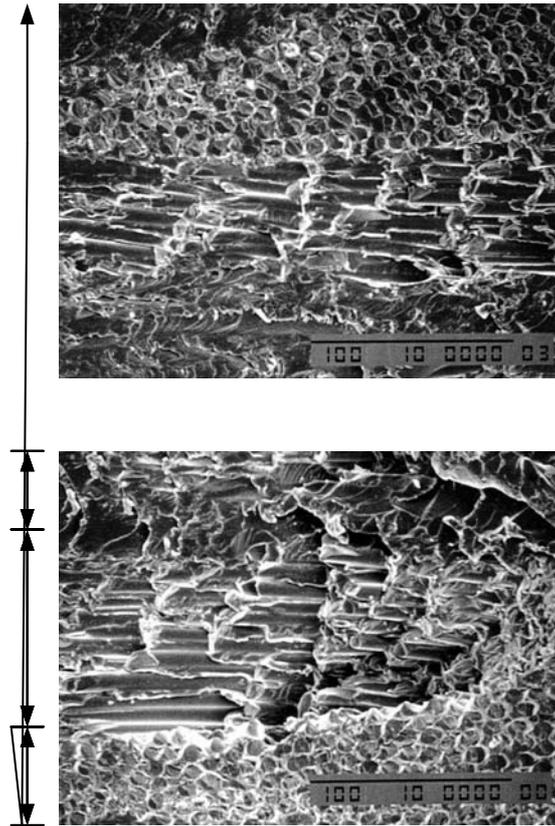


Fig.6-6 SEM micrographs of damaged fiber in layer of glass fiber.

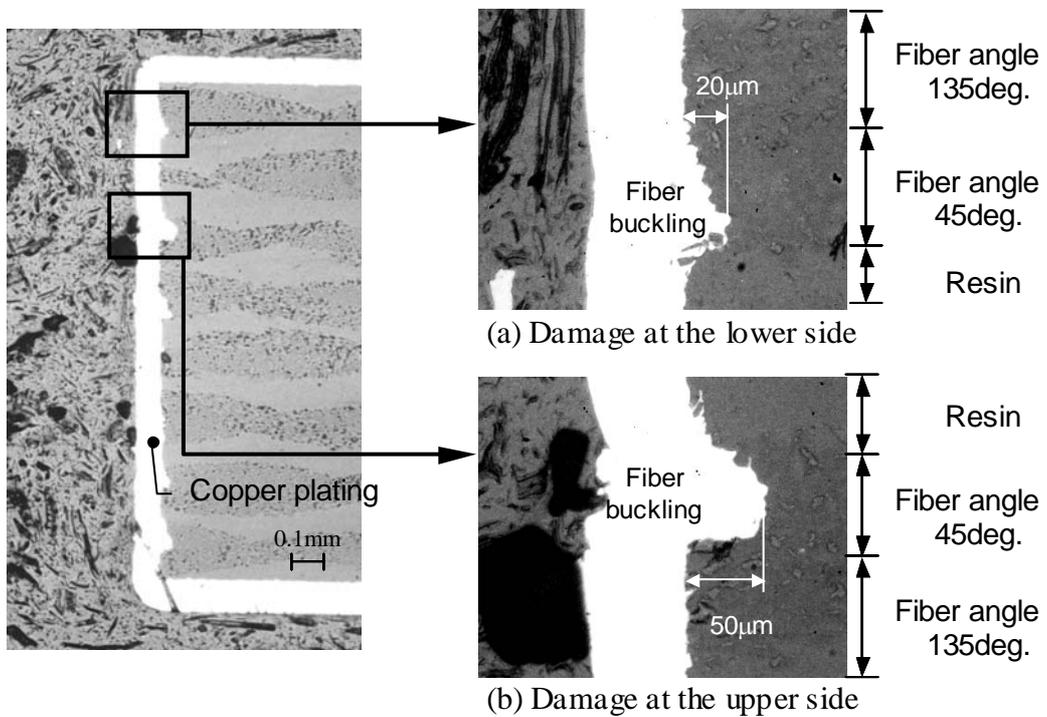


Fig.6-7 Micrographs of drilled hole wall.

きがみられる。この原因としてドリル加工時の繊維と樹脂の積層構成の違いが考えられる。Fig.6-6(a), (b)は、ドリル加工した積層板の掘り起こし部分に対しエポキシ樹脂が下部に積層された場合と、上部に積層された場合のSEM写真を示す。Fig.6-6(a), (b)より、損傷を受ける繊維（繊維角 45deg.）が、繊維層内で下部か上部に積層されることで掘り起こし深さが異なることが分かる。また、スルーホールメッキ後の断面写真をFig.6-7に示す。Fig.6-7(a)は損傷を受ける繊維（繊維角 45deg.）の上部に繊維角 135deg. の繊維が存在している。Fig.6-7(b)は損傷を受ける繊維（繊維角 45deg.）の上部に樹脂が存在している。両図を比較すると、Fig.6-7(a)では掘り起こし深さが約 20 $\mu\text{m}$ 、Fig.6-7(b)では掘り起こし深さが約 50 $\mu\text{m}$  となり、明らかに Fig.6-7(b)の掘り起こしが深いことが観察される。したがって、加工穴損傷は損傷を受ける繊維が、繊維層内の上部または下部に存在することで損傷形態が異なり、スラストの回転4次成分のばらつきが発生する一因

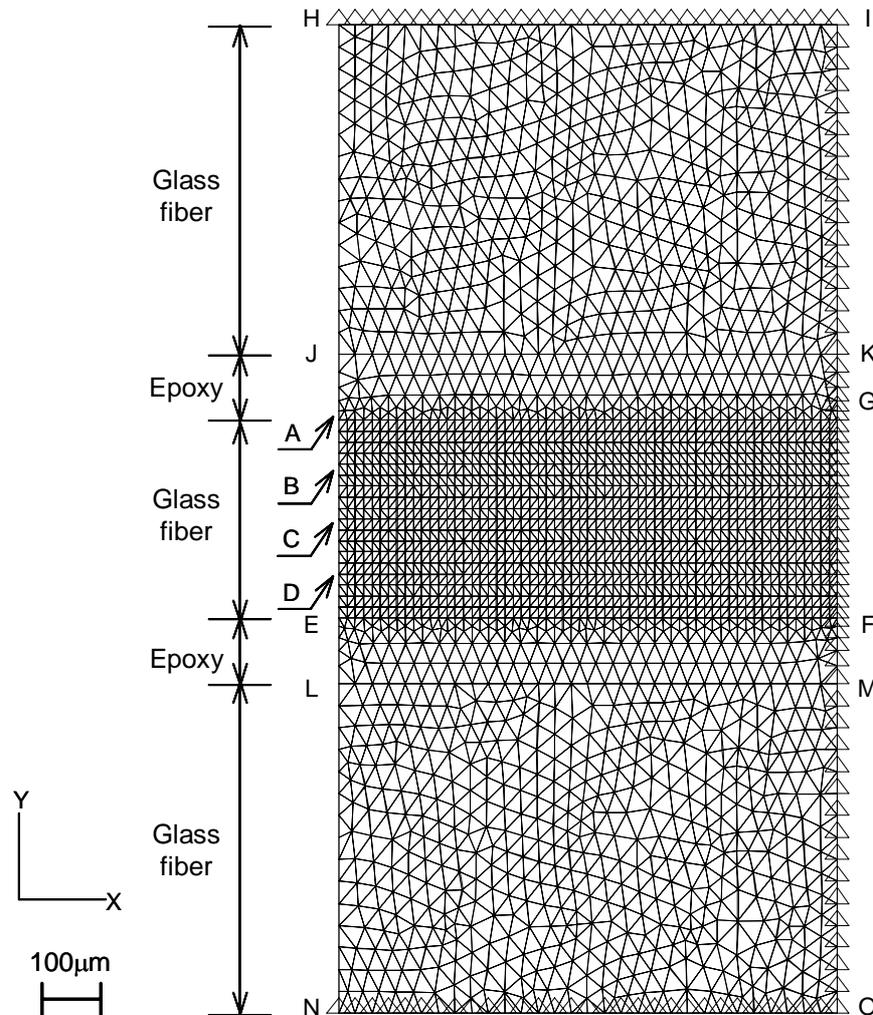


Fig.6-8 FEM model.

になっているものと考えられる．この結果を踏まえて，損傷を受ける繊維の積層構成の位置を取り上げ，これが損傷の大きさに影響を与える原因について考察する．この要因について考えると，損傷部分の剛性に影響を与えていることが挙げられる．そこで，この要因が損傷部分の剛性にどのように影響し，また損傷の大きさに影響を与えているのかについて有限要素法を用いて検討した．

Fig.6-8は解析に用いた有限要素法の分割の一例を示したものである．損傷部の剛性の影響を定性的に知ることを目的としているので，樹脂層及び繊維層とも等方性材料として扱った．境界条件は辺IOを完全拘束とし，辺HI，NOはY軸方向のみ拘束した．解析には日本エムエスシー製MSC/NASTRANを用い，二次元平面ひずみ問題として扱った．要素分割はMSC/NASTRANに含まれる自動要素分割プログラムFEMAPを用いて行い，三角形要素に分割した．ガラス繊維とエポキシ樹脂の物性値（ヤング率，ポアソン比）は

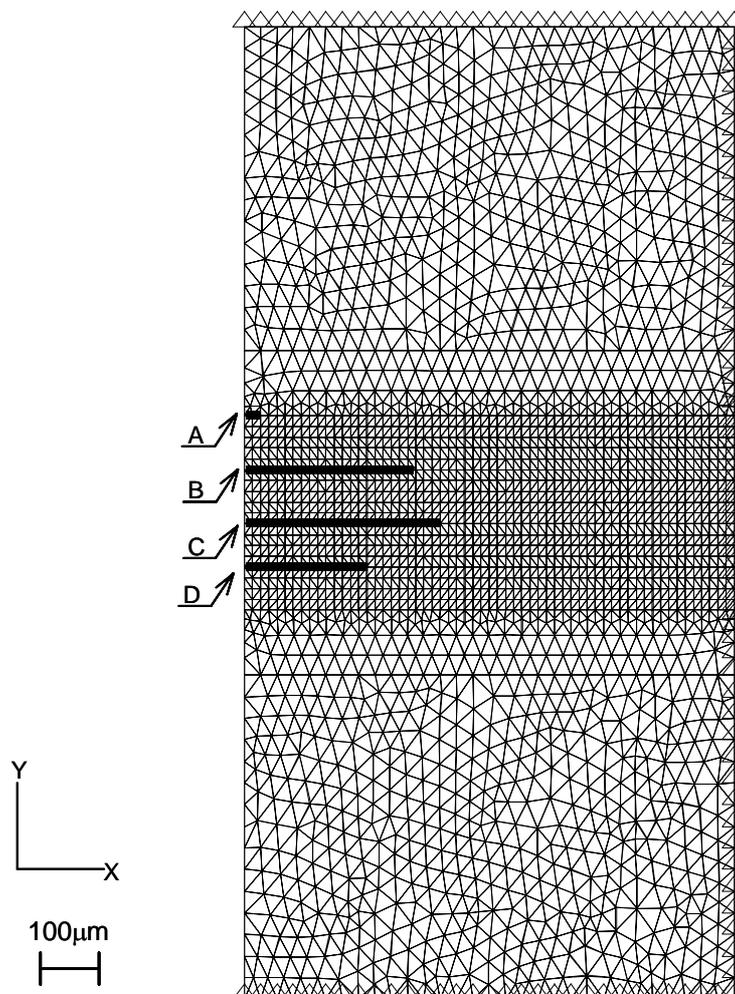


Fig.6-9 Calculated results of damage area.  
( thickness of glass fiber bundle=180µm)

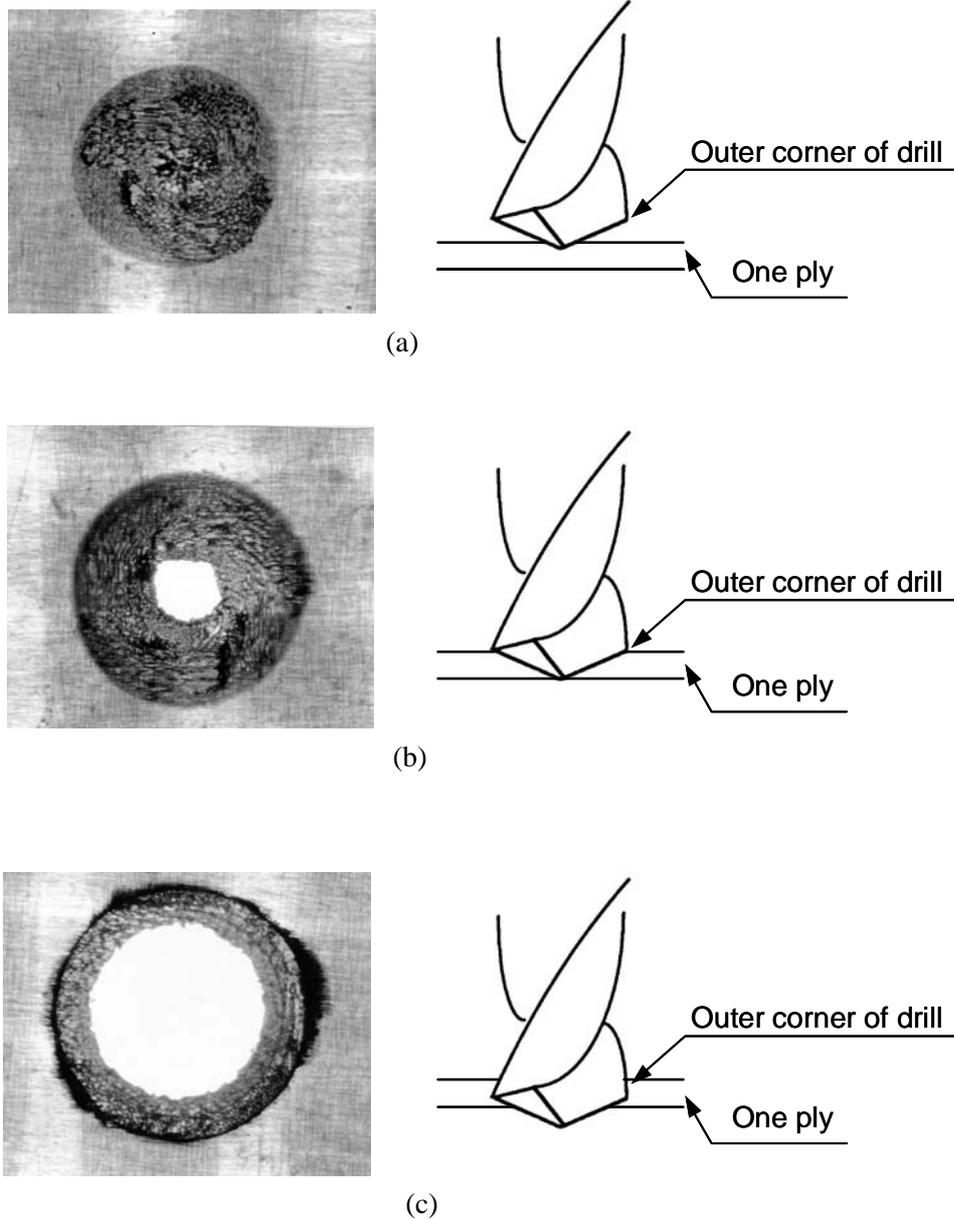


Fig.6-10 Micrographs of drilled lamina at halfway in drilling.

Table2-1, 2-3より引用した。本解析ではFig.6-8に示す点A, B, C, Dに単位荷重が-Y軸方向に作用した時, その荷重作用点から+X軸方向に破壊が進行するものとし, 破壊の進行による応力の変化を調べた。破壊の進行は破壊した点までの要素の破面上の節点を分離することにより表現した。解析結果より損傷範囲を求めたものをFig.6-9に示す。Fig.6-7(b)の加工穴断面のSEM写真と比較すると, 解析結果により求めた損傷範囲は実際の損傷範囲と定性的に一致しており, 本解析手法は妥当なものと考えられる。また, Fig.6-9の繊維層において, クロス材においてはガラス繊維層の上下半分で繊維の方向

が異なるため、繊維角の関係で損傷はどちらか半分にしか生じない。そこで、B点とD点を比較するとB点の方が損傷範囲が広く、損傷の生じる繊維角の繊維が積層構成の上側にある方が損傷が大きくなることが分かる。これは、B点とD点での剛性が違うためと考えられる。そのため、Fig.6-6(a),(b)で述べたような現象が発生し、同じ繊維角 - 繊維厚さにおいてデータがばらついたことが分かった。

Fig.6-10は一層材を貫通させる前に送りを急停止した時の内部損傷の結果である。Fig.6-10(a),(b)よりチゼル及び切れ刃で一層材を切削するときには加工穴の外周に内部損傷はほとんど観察されない。また、下部当て板無しで加工した場合のように、チゼル部の推力で穴周辺に繊維のはく離が発生することもない。一方、Fig.6-10(c)より、ドリル肩部が一層材に到達した時に、加工穴外周に内部損傷が発生することが観察される。当て板で材料が固定されている場合のドリル加工では、チゼル、切れ刃の順に試料に到達し、最終的に加工穴壁面を生成する部位はドリル肩部となるため、加工穴外周(壁面)の損傷を決定するのはドリル肩部となる。したがって、加工穴周辺の内部損傷はドリル肩部によって発生することが分かり、ドリル肩部の形状は内部損傷に対して最も重要な要因の1つである。

#### 6-3-4 工具切れ刃及び肩部形状の違いが回転4次成分に及ぼす影響

前項での回転4次成分と内部損傷の観察の結果から、ドリル肩部が内部損傷の発生に対して重要な要因であることが分かった。そこで、肩部形状の異なる工具で穴あけ加工を行った。

Fig.6-11はTYPE B、Fig.6-12はTYPE Cの工具で、積層板を加工したときの回転4次成分の時間的変化を示したものである。図の横軸には肩部の試料内の位置を併記する。

Fig.6-11より、肩部がアルミ板に位置するときには回転4次成分は発生していないが、積層板に達したときに大きく発生するのがわかる。また、回転4次成分は、ドリル肩部が樹脂リッチ部にある時も繊維リッチ部にある時でも増大する。これは、TYPE Bの工具の先端から肩部までの距離が0.5mmであり、肩部が積層板に達してから、およそ2.5層分を工具が加工しているためであると考えられる。

Fig.6-12より、肩部がアルミ板に位置するときには回転4次成分はほとんど存在しないが、肩部が繊維リッチ部にほぼ達したときに回転4次成分が増大することがわかる。また、肩部が繊維リッチ部を加工しているときの回転4次成分の値と樹脂リッチ部を加工しているときの値との差は、Fig.6-5に比べ大きくなっている。これは、工具先端と肩部の距離が0であるため、1回転で繊維リッチ部と樹脂リッチ部を同時に加工しないためと考えられる。

各工具の肩部が試料に達したときから貫通するまでに発生した回転4次成分の平均値

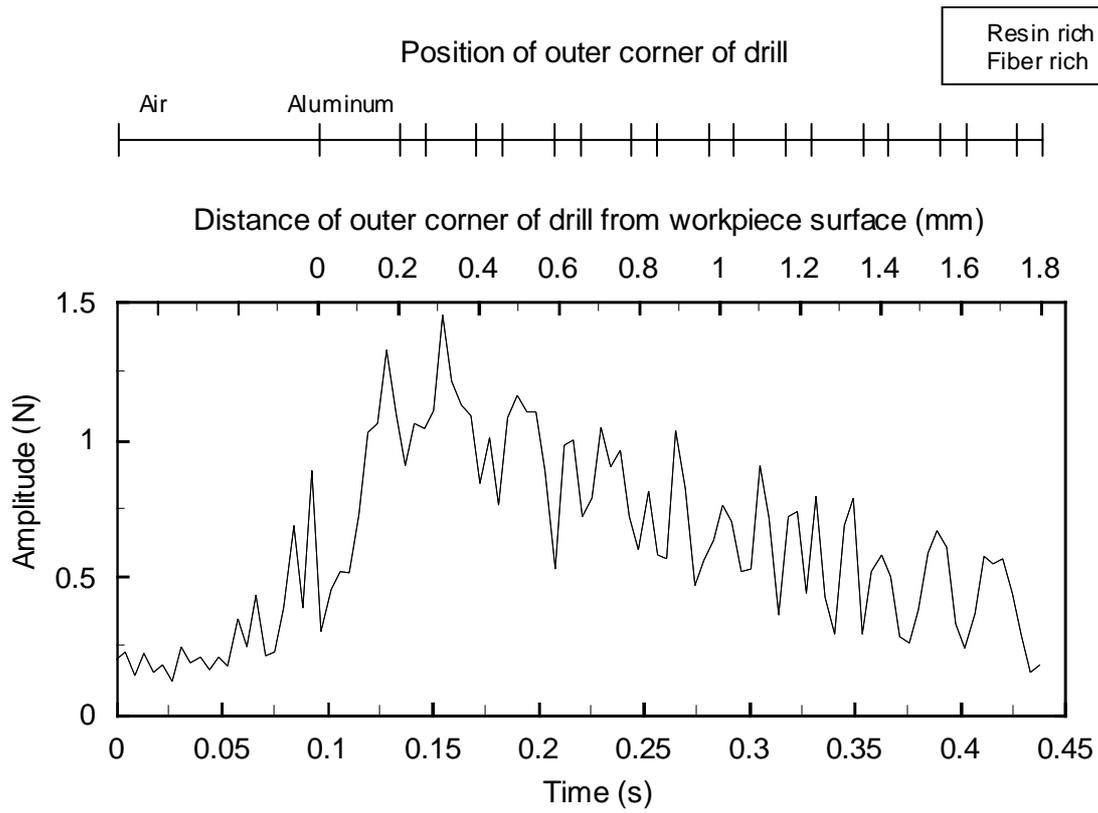


Fig.6-11 Amplitude of 4th harmonic component of rotation (TYPE B).

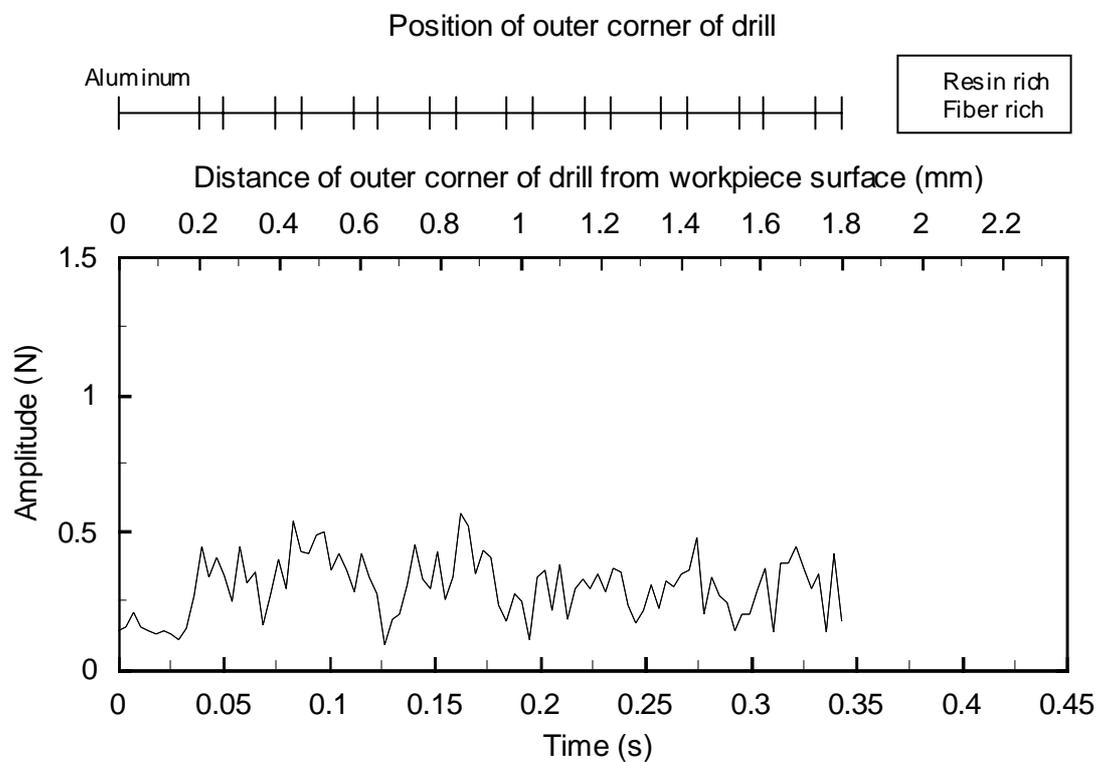


Fig.6-12 Amplitude of 4th harmonic component of rotation (TYPE C).

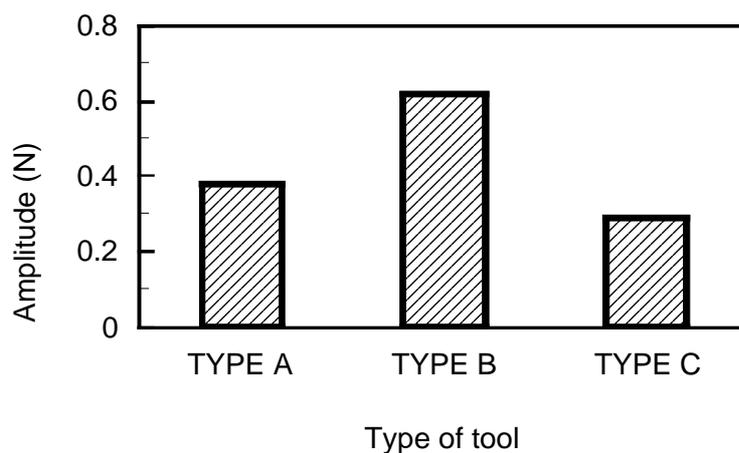


Fig.6-13 Average amplitude of 4th harmonic component of rotation.

を調べた。その結果を Fig.6-13 に示す。この図より、TYPE B で加工を行った時の回転 4 次成分は他の工具で加工を行ったときに比べ大きな値となる。これは、TYPE B の先端から肩部までの距離が 0.5mm と他の工具よりも大きいため、1 回転当たりに加工に要する負荷が大きいためと考えられる。また、TYPE C で加工を行った時の回転 4 次成分は他の工具で加工したときよりも小さいことが分かる。これは、TYPE A は工具の肩部には切れ刃がなく、TYPE C の工具は肩部に切れ刃が存在するためと考えられる。すなわち TYPE C では、切れ刃を有する肩部で繊維束を切削するため、繊維角の影響が抑えられたためと考えられる。

### 6-3-5 工具肩部形状が内部損傷に及ぼす影響

Fig.6-14 はそれぞれの工具で一層材を加工したときの、回転角と損傷幅の関係を示したものである。この Fig.6-14 より、TYPE B (ボールエンドミル) による損傷幅は回転角 0deg. ~ 30deg. 付近では約 40 $\mu$ m となり、回転角 60deg. 付近では損傷幅は約 70 $\mu$ m と増大している。これは TYPE A (標準ドリル) と同じような傾向を示しているが、TYPE A に比べ損傷幅はやや大きいことが分かる。TYPE C (スクエアエンドミル) による損傷幅は回転角 0deg. ~ 30deg. 付近では TYPE A とほぼ同じとなり約 25 $\mu$ m 程度で、TYPE A 及び TYPE B の損傷幅が悪化した回転角 60deg. 付近での損傷幅はおよそ 40 $\mu$ m 程度である。したがって、TYPE C の損傷幅は、他の工具に比べ低減されており、損傷幅の異方性が少なく良好な結果が得られた。前項より、TYPE C は回転 4 次成分が他のものよりも小さいことから、回転 4 次成分を抑えるような工具の肩部形状が内部損傷の低減に有効であり、また、工具の肩部に切れ刃をもつ工具が加工穴品質の向上に有効である。

TYPE B の損傷幅が他の工具による損傷幅より増大した原因の一つとして「壁面生成織

維」の存在が考えられる。工具が1回転当たり穴壁面を生成するときに切削する繊維を壁面生成繊維と定義する。Fig.6-15は各工具による穴あけ加工時において繊維束を切削している状態を幾何学的に考えたときの模式図を示したものである。Fig.6-15(a)において、ドリルが図に示す送り量(Feed rate)で穴あけ加工しているとすると、ドリルは1回転当たり実線から破線の部分に移動する。ドリル1回転の間に切削した繊維の領域は点線に囲まれた領域となるが、ドリルが穴壁面を生成するときに切削する繊維すなわち壁面生成繊維は斜線部になる。壁面生成繊維の水平方向の長さに注目するとTYPE Bの壁面生成繊維の長さが他のものに比べ短いことが分かる。繊維が曲げモーメントによる応力で切断されるとすれば、壁面生成繊維が短いほど繊維切断に要する力は大きくなる。したがって、繊維切削時にガラス繊維とエポキシ樹脂の界面に作用する力は大きくなると考えられる。そのためガラス繊維とエポキシ樹脂間ではく離等の内部損傷が大きくなると考えられる。また、TYPE Cでは壁面生成繊維の長さが他の工具よりも長く、工具の肩部にも切れ刃を有することから内部損傷が低減したものと考えられる。ただし、この結果は加工回数初期段階での評価であり、加工回数が増加する場合には、工具摩耗などによる影響を考慮する必要がある。

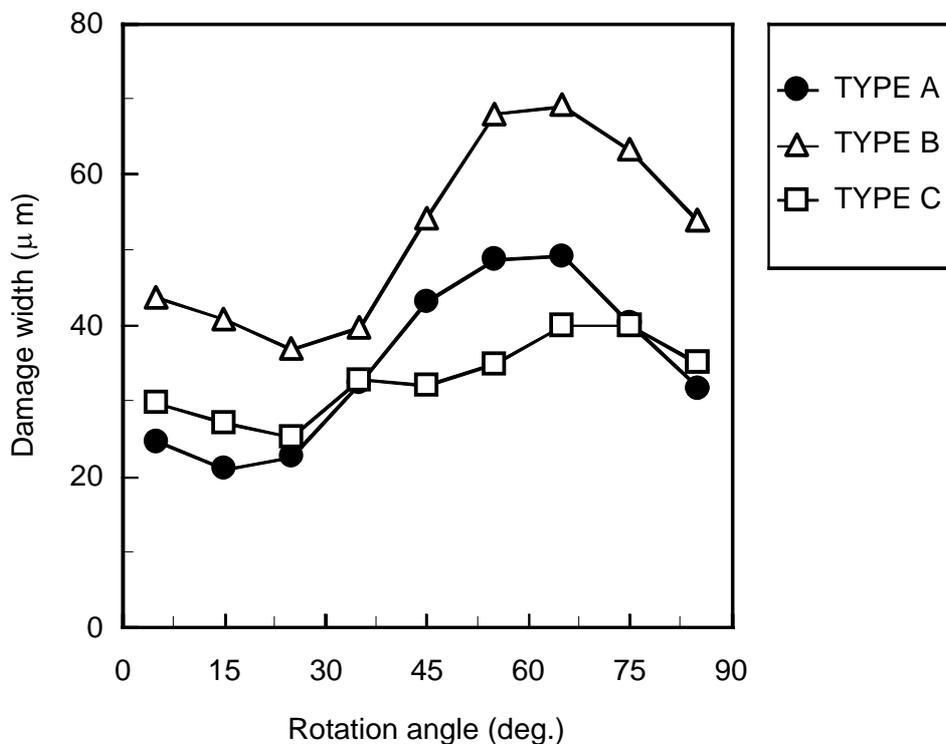
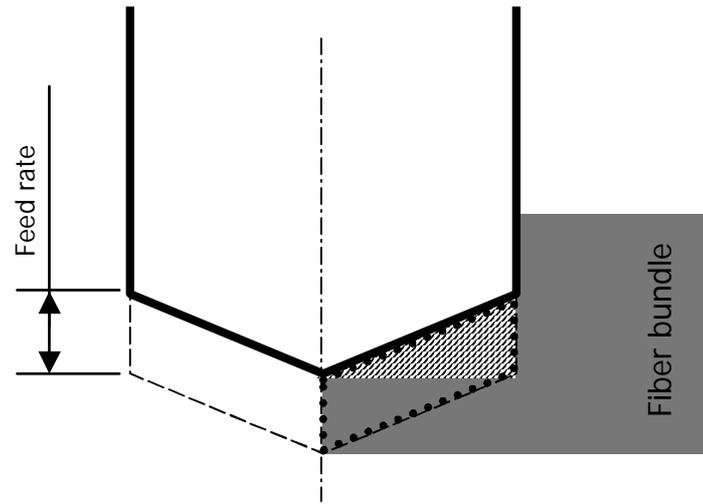
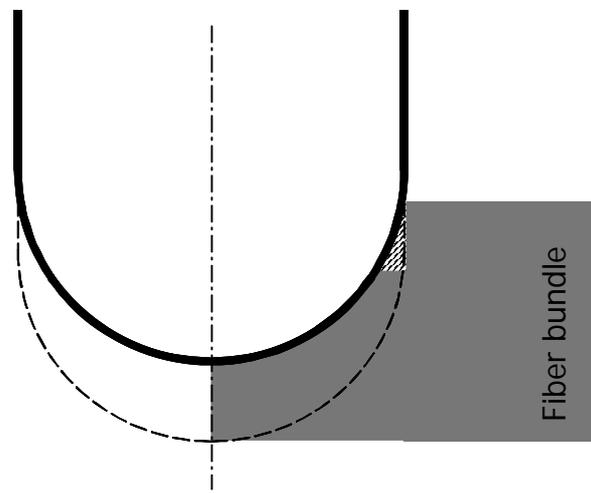


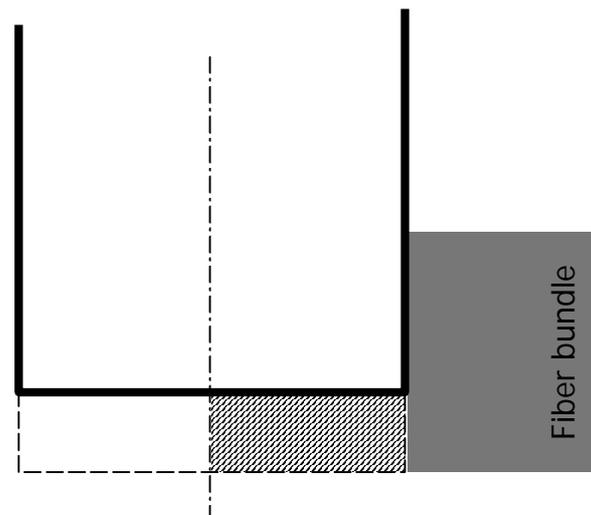
Fig.6-14 Relation between damage width and rotation angle.



(a) Drill (TYPE A)



(b) Bowl end mill (TYPE B)



(c) Square end mill (TYPE C)

Fig.6-15 Drilling process of cutting edge of tool.

## 6-4 結 言

ドリル加工時のスラスト力を詳細に調べ、内部損傷との関係を明らかにし、その発生メカニズムを解明した結果、以下の結論を得た。

- (1) 平織り材のドリル加工の特徴の1つとして加工穴周辺に4箇所内部損傷が発生することが分かった。
- (2) スラスト力には、ドリル1回転当たり4つの極大値を示す変動成分が存在する。この変動成分の極大値と極小値の1/2を回転4次成分と定義し、回転4次成分は加工穴周辺の内部損傷と関連があることが分かった。
- (3) 回転4次成分はドリルの肩部により大きく発生することが分かった。
- (4) 工具の肩部の形状によりスラスト力の形態は変化し、回転4次成分もドリルの切れ刃及び肩部形状に影響されることが分かった。また、当て板で保持された状態でドリル加工されるプリント基板においては、工具の肩部形状の改善が内部損傷の低減に有効であることが分かった。さらに、加工中の工具と繊維との関係から「壁面生成繊維」の概念を提案し、この概念より内部損傷の低減に有効な工具形状の設計指針を明らかにした。
- (5) 加工穴損傷は、損傷を受ける繊維が繊維層内の下部に存在するより上部に存在する方が大きく発生することが分かった。

---

## 第7章

### 工具摩耗と加工穴品質の変化<sup>[8],[9],[17]</sup>

---

これまでの章では、加工回数が初期段階での加工穴品質を述べてきた。実際にはプリント基板の穴あけ加工で1つの工具で膨大な数の加工が行われる。ドリルによる穴あけ加工は接触加工であるため被削材と工具の摩擦により発生する工具摩耗は避けられず、工具摩耗による加工穴品質の低下が問題となっている。そこで、本章では加工回数と工具摩耗の関係を調査する。まず切削抵抗と加工回数の関係を調べ、また工具摩耗が加工穴品質に及ぼす影響についても考察した。次に、工具の長寿命化の要求が強まっており、新しい工具としてダイヤモンドコートドリルが開発されたことを受け、このドリルと従来の超硬ドリルで摩耗実験を行い、摩耗特性と加工穴品質を評価する。

#### 7-1 緒言

第2章～第6章までは、加工穴数初期段階での加工穴品質について考察してきた。実際のプリント基板の穴あけ加工では、穴密度の増大及びスルーホール小径化により1つの工具で膨大な数の加工が行われる。加工穴数が増えれば、高強度なガラス繊維との摩擦で工具摩耗が発生し、工具摩耗は接触加工であるドリル加工では避けることができない。したがって、工具摩耗による加工穴品質の劣化は必至である。加工穴品質が低下すれば、これまで述べているように後工程に悪影響を及ぼすだけでなく、プリント基板が内装される機器全体の故障にもつながりかねない。これまでの研究では、工具摩耗と穴位置精度に関するものが論じられている<sup>[85]</sup>。平中ら<sup>[68]</sup>は工具寿命に至るまでの過程における穴の曲がりについて調査している。また大久保ら<sup>[83]</sup>はドリル破損の形態と破損原因の究明を行い、ドリル破損のメカニズムを解明している。しかし何れの研究も、ドリルの摩耗現象を調べながらプリント基板の加工穴品質を評価した報告はほとんどされていない。また、プリント基板の実装密度の向上及びスルーホール小径化<sup>[181],[186],[187]</sup>により、穴の曲がりによる穴位置精度の誤差が重大な問題となってきている。ドリルが小径にな

るほど曲げ剛性は低下し穴の曲がりによる位置精度が悪化する。プリント基板上で穴の曲がりは隣接するランド同士の接触やランドからのはみ出しなどが発生し加工穴品質が著しく劣化し、プリント基板の製造工程中の不良につながる。したがって、工具摩耗と穴の曲がりについての相関を調査する必要がある。

そこで本章では、加工を経て摩耗したドリルが加工穴品質に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、ドリルが摩耗する要因を調べ、加工穴数毎にドリル摩耗がスラスト力に与える影響を考察した。また、工具摩耗が内部損傷及び穴の曲がりに及ぼす影響についても調べた。さらに、耐摩耗性に優れ品質の安定化の観点から着目されているダイヤモンドコートドリルを採用し、その摩耗特性と加工穴品質をコート無ドリルと比較検討した。

## 7-2 実験方法及び評価方法

### 7-2-1 被削材及び実験装置

実験に使用した被削材は、ガラスクロス基材エポキシ樹脂板で最も多用されているJIS-GE4Fとした。ガラスクロスは7628( IPC-EG-140の規格名称)で、ガラス繊維はEガラスを使用している。板厚1.6mm(ガラスクロス積層数8層)の積層板と板厚0.2mm(ガラスクロス積層数1層)の一層材を用いた。Table 2-1にEガラスの諸特性を、Table2-2にガラスクロスの諸特性を、Table2-3にエポキシの諸特性を示す。

実験においてはFig.2-3に示すように、通常のプリント基板の穴あけ時と同様にドリルの振れを抑え、入り口部のバリを防ぐために上部当て板としてアルミニウム板(板厚

Table 7-1 Cutting condition.

| <i>Diameter</i> | <i>Spindle speed</i> | <i>Cutting speed</i> | <i>Feed speed</i> | <i>Feed rate</i> |
|-----------------|----------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| D mm            | N rpm                | V m/min              | F mm/min          | f μm/rev         |
| 1.0             | 33,000               | 103.6                | 170               | 5                |
|                 |                      |                      | 1,000             | 30               |
|                 |                      |                      | 2,000             | 60               |
| 0.4             | 66,000               | 82.9                 | 340               | 5                |
|                 |                      |                      | 1,000             | 15               |
|                 |                      |                      | 2,000             | 30               |

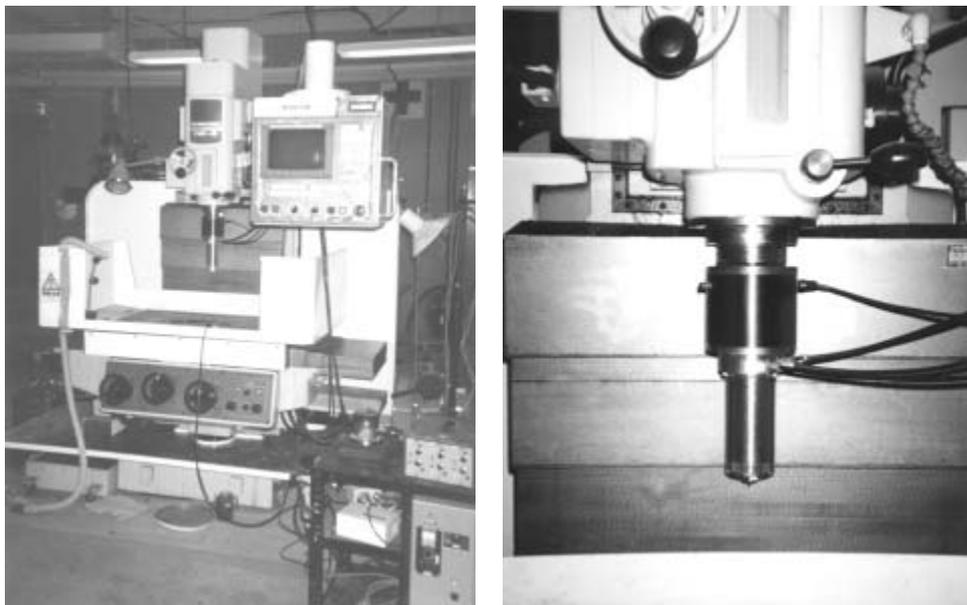
$$V = \frac{\pi DN}{1000}$$

$$f = \frac{F}{N} \times 10^3$$

0.2mm) を、ドリルの破損及び出口部のバリを防ぐために下部当て板としてベークライトを使用した。出口部で当て板無しでドリル加工を行った場合には、ドリルチゼルの推力で穴出口部の方向にガラス繊維がはく離することが知られているが、本加工では十分な当て板で保持することで、このようなはく離を防止してある点が特徴である。また、一層材は上部当て板と積層板の間に挟んで同時に加工した。これにより、積層板と一層材の切削状態は一致している。切削抵抗はドリル送り方向の力であるスラスト力に着目し、このスラスト力を測定した。測定方法はFig. 3-1に示すように、キスラー社製圧電方動力計 (TYPE 9373) の上部に取り付けた被削材をドリル加工し、動力計により得られる信号を同社製チャージアンプ (TYPE 439) を介してティアック社製データレコーダ (XR-7000) に取り込み測定した。上部当て板のアルミ板と下部当て板であるベークライトの間に被削材を挟んで加工を行った。

一層材の内部損傷の観察にはニコン社製実体顕微鏡 (SMZ-U) を使用し、画像処理は実体顕微鏡に日本ビクター社製 CCD (Charge Coupled Device) カメラ (TK-1070) を取り付け、ピラス社製画像処理装置 (PIAS- ) を使用した。使用した CCD カメラの有効画素数は 768 (水平) × 493 (垂直) である。一層材の内部損傷の評価には 2-2-2 項で説明した画像処理システムを使用した。

ドリルによる穴あけは大隈豊和機械社製 NC フライス盤 FMR-40 の主軸に NTN 社製マイクロエアドリルスピンドル HB-RD47KU-02 を取り付け、Table7-1 に示す切削条件で行っ



(a) NC milling machine

(b) Air spindle motor

Fig.7-1 Experimental unit.

た。Fig.7-1に実験装置の外観写真を示す。摩耗実験では主に2枚重ねで行った。工具はMMC コベルコツール社製超硬PCBドリルKUL100 [以下,コート無ドリル(WC drill)]と称す]及びダイヤモンドコートPCBドリルKULD100[以下,コートドリル( Coated drill)]と称す]を使用した。工具径は1.0mmと0.4mmである。ダイヤモンドコートドリルはコート無ドリルに比べ非常に耐摩耗性に優れ,工具の長寿命化を実現した工具である。従来,工具に高硬度な材料( Table7-2に示すTiC, TiN)をCVD法<sup>註1</sup>又はPVD法<sup>註2</sup>によりコーティングさせる技術は行われていた<sup>[190]</sup>が,これまでにダイヤモンドをコーティングさせた工具は商品化されていなかった。本研究で使用したコートドリルはCVD法によりダイヤモンドを被膜したものである。Table7-2より,ダイヤモンドは他の材料に比べ非常に高硬度な材料であることが分かる。

Table 7-2 Properties of coating materials.

| Material                            |                    | TiC  | TiN  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Diamond |
|-------------------------------------|--------------------|------|------|--------------------------------|---------|
| Density                             | g/cm <sup>3</sup>  | 4.94 | 5.44 | 3.98                           | 3.58    |
| Hardness                            | H <sub>v</sub>     | 3000 | 2100 | 2300                           | >9000   |
| Fusing point                        |                    | 3150 | 2950 | 2300                           | 3700    |
| Coefficient of thermal expansion    | 10 <sup>-6</sup> / | 7.7  | 9.4  | 8                              | 1.5     |
| Coefficient of thermal conductivity | W/(m K)            | 5.2  | 7.4  | 5.9                            | 400     |

註1 化学蒸着法。Chemical Vapor Deposition。反応室内の基体を加熱後,原料ガスを送り込み基体表面での化学反応によってTiCなどを析出する方法である。原料ガスは水素,炭化水素,窒素,炭酸ガス,ハロゲン化合物が多く使用される。化学反応は通常1000 前後の温度で行われるが,ガス圧力は減圧法(50 ~ 300Torr)と大気圧法(760Torr)がある。長所は,基体の全面に均一な被膜が可能であり,処理温度が高いため被膜層と基体の密着強度が高い。また,異なる被膜層がガスの切り替えだけで容易にでき,装置の大型化が容易で量産に適している。短所は,母材表面付近に脱炭などによる変質層が生成しやすく,寸法変化や変形が起こりやすい<sup>[174]</sup>。

註2 物理蒸着法 Physical Vapor Deposition。切削工具へのPVD法で最も広く使用されているのは,反応性イオンプレーティングと呼ばれる方法である。これは被膜層の主成分である金属を蒸着させてイオン化し,ガスと反応させて硬質物質を母材に蒸着させる方法である。反応室を10<sup>-4</sup> ~ 10<sup>-5</sup>Torrの高真空にして蒸発源の金属を電子ビームなどで溶解し蒸発させる。ここに炭化窒素,窒素,酸素などの反応ガスを供給し,これらをグロー放電によってイオン化し,10<sup>-2</sup> ~ 10<sup>-3</sup>Torrのプラズマ状態で反応させ,母材表面に硬質物質を析出させる。熱源にはプラス,母材にはマイナスの電圧をかけ,数百 ~ 数千Vの電位差でイオンを加速し,母材に衝突させるために500 以下の低温でも被膜が可能であり,CVD法で問題とされる脱炭層の生成,基体の寸法変化等が小さい。しかし低温での処理であるため,密着性が弱く,基体の正面に比べ端面や傾いた面には被膜層がつきにくい。また,PVD装置は被膜真空室以外に高真空系,治具の回転装置,特殊電源などが必要になるため装置が高価になり,CVD法に比べると製造コストは高くなる<sup>[174]</sup>。

## 7-2-2 工具摩耗の評価方法

工具摩耗の測定にはニコン社製の金属顕微鏡にSynoptic社製の画像合成システムAll-in-Focus DM-99iを使用した。ドリルは先端角が130deg.であるため、Fig. 7-2に示すような箇所を観察する場合、工具径を $D=1.0\text{mm}$ とすると工具中心と工具外周との深さはおよそ $0.2\text{mm}$ となり、金属顕微鏡や実体顕微鏡では高倍率になると焦点深度が浅くなるため鮮明な画像が得られない。そこで、この画像合成システムを利用すると、同一視野で合焦面が異なる複数の画像を取り込み、観察物の深さの方向の全体にピントの合った鮮明な画像が得られる。したがって、工具摩耗を観察するには非常に適した装置である。

ドリルは摩耗により切れ刃に近い逃げ面と摩耗面の傾きが異なり、それらの面では光を当てたときの反射が異なる。そのため、金属顕微鏡で画像合成するとFig.7-2のように白く光る部分が現れる。この白く光る部分のうちFig.7-2に示す長さを摩耗幅とし、左右の切れ刃の平均を採用した。また、Fig.7-2から分かるように、画像合成システムは数10枚の画像の中から、焦点の合った箇所のみを合成して1枚の画像にすることにより、焦点深度が深く鮮明な画像が得られるため小径ドリルの摩耗を安定して測定できるものである。

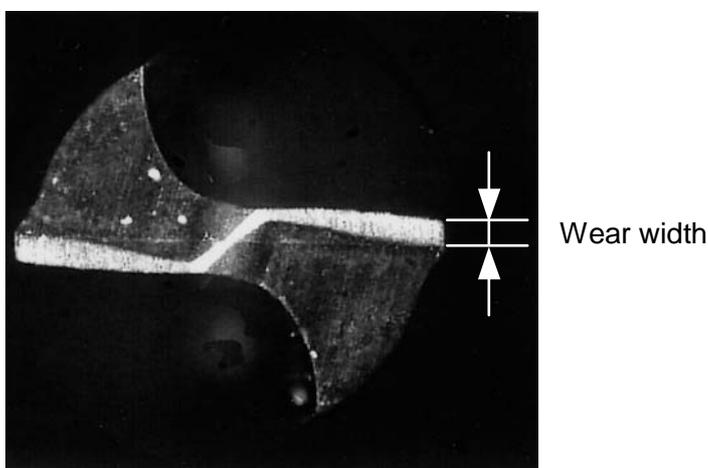


Fig.7-2 Definition of wear width.

## 7-2-3 加工穴の曲がりの評価方法

穴の曲がりの測定は、加工穴入口部と出口部の位置のズレを求めることにより行った。工具摩耗の測定でも利用したAll-in-Focusを用いてドリル食い付き側（入口部）の加工穴画像を取り込み、ワークを動かさずに同じ加工穴の貫通側（出口部）の穴形状に焦

点を合わせてその画像を取り込む．これらの画像より Fig.7-3 に示すように 2-2-2 項で用いた円の近似式によって加工穴中心を求め中心座標の偏移を穴の曲がり量として求めた．ただし，穴の曲がり量は積層板枚数が 1 枚 (1.6mm) 当たりの値である．

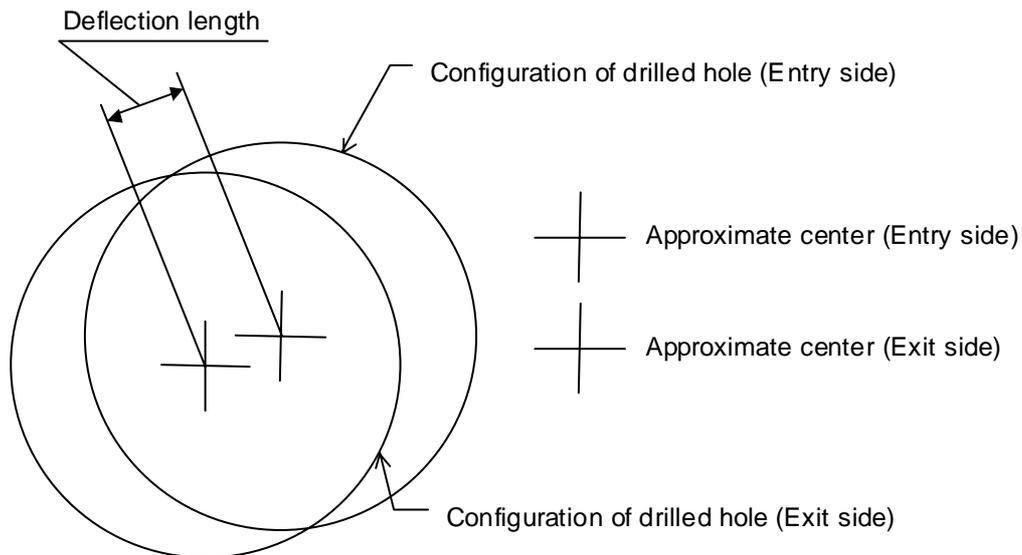


Fig.7-3 Definition of deflection length of drilled hole.

### 7-3 プリント基板加工時の超硬ドリルの摩耗

#### 7-3-1 切削抵抗の特徴

Fig.7-4 はコート無ドリルの摩耗幅とスラスト力の関係 ( $F_s$ ,  $F_d$ ,  $F_p$ ,  $F_b$  の定義については Fig.3-9 を参照) を示したものである．Fig.7-4 より，摩耗幅が増加するとスラスト力も増加するが， $F_d$  の増加割合が他に比べて小さい．これはガラスクロス部分の切削時のスラスト力  $F_p$  と樹脂部分の切削時のスラスト力  $F_b$  の値が同じように増加するためである．しかし，わずかに  $F_p$  の増加割合が大きいため  $F_d$  が微増する．そこで， $F_p$  と  $F_b$  の影響も合わせて評価するために摩耗量の変化をスラスト力の静的成分  $F_s$  を用いて評価した．また， $F_p$  と  $F_b$  の増加割合がほぼ同じであることから，この  $F_s$  の増加は切りくず生成に要する切削力増加のためでなく，切れ刃食い付きに要する切削力増加によるものと考えられる．

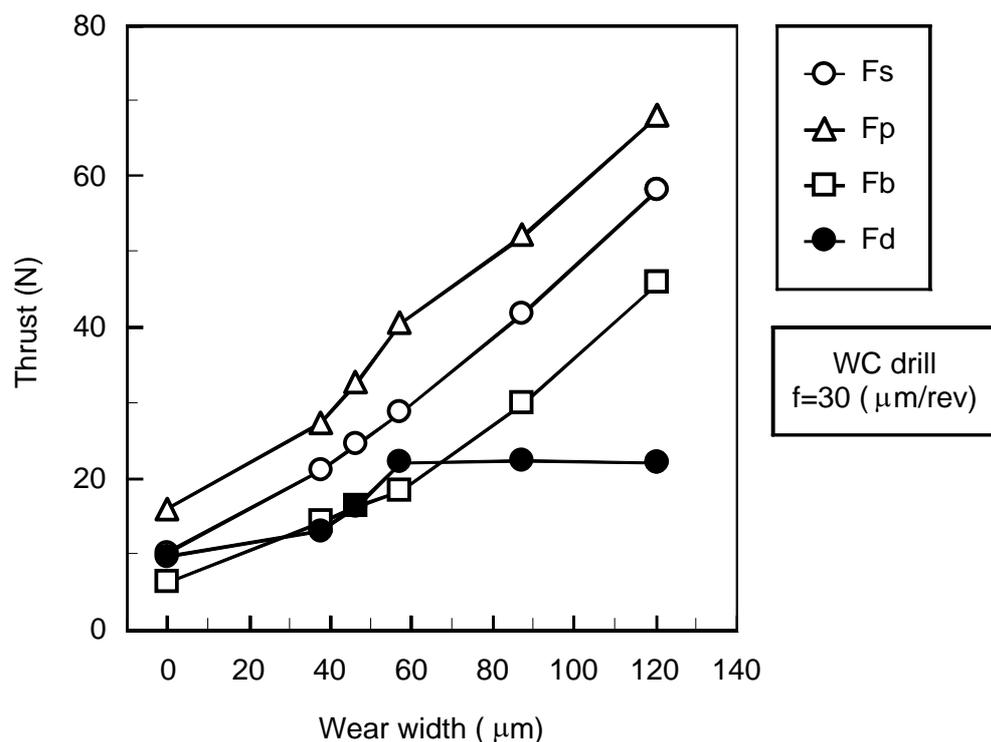


Fig.7-4 Relation between thrust and wear width.

### 7-3-2 工具摩耗に与える各要因の検討

Fig.7-5は、加工穴数とFsの関係を基板の重ね枚数別に示したものである。Fig.7-5より、加工穴数の増加に伴いFsも大きくなっているのが分かる。ここで、積層板重ね枚数が2枚の5000穴目のFsと重ね枚数1枚の10,000穴目のFsの値を比較してみる。この2点はドリル切削距離が同じで、加工穴数は2倍異なる。しかし2点のFsの値はほぼ同じである。また、各加工穴数毎のFsを見てみると積層板の枚数の増加に伴って、Fsの値も増加していることが分かる。すなわち、加工穴数は同じであるが、切削距離が増すことによりFsも増加するのである。また、その時の積層重ね枚数と摩耗幅の関係をFig.7-6に示す。Fig.7-6より、基板重ね枚数が多くなるほど摩耗幅が大きくなり、ドリルをより摩耗させていることが分かる。よって、加工穴数よりも切削距離の方がドリルの摩耗に与える影響が大きいことが分かる。以上より、当て板のアルミニウム板や積層板の銅箔の切削による影響よりも、切削距離による影響が大きいことが示された。

各送り量での10,000穴時点におけるドリル形状のSEM写真及び画像合成システムによる観察写真をFig.7-7に示す。Fig.7-7より、ドリルが摩耗すると大きく肩部が丸みを帯びて鈍化し摩耗幅も大きくなることが分かる、一方、送り量が小さいほど摩耗度合いが大きいことが分かる。また、チップング等の大きなカケは見られないので、ガラス繊維によるアブレッシブな工具摩耗の影響が大きいものと考えられる。その時の送り量と

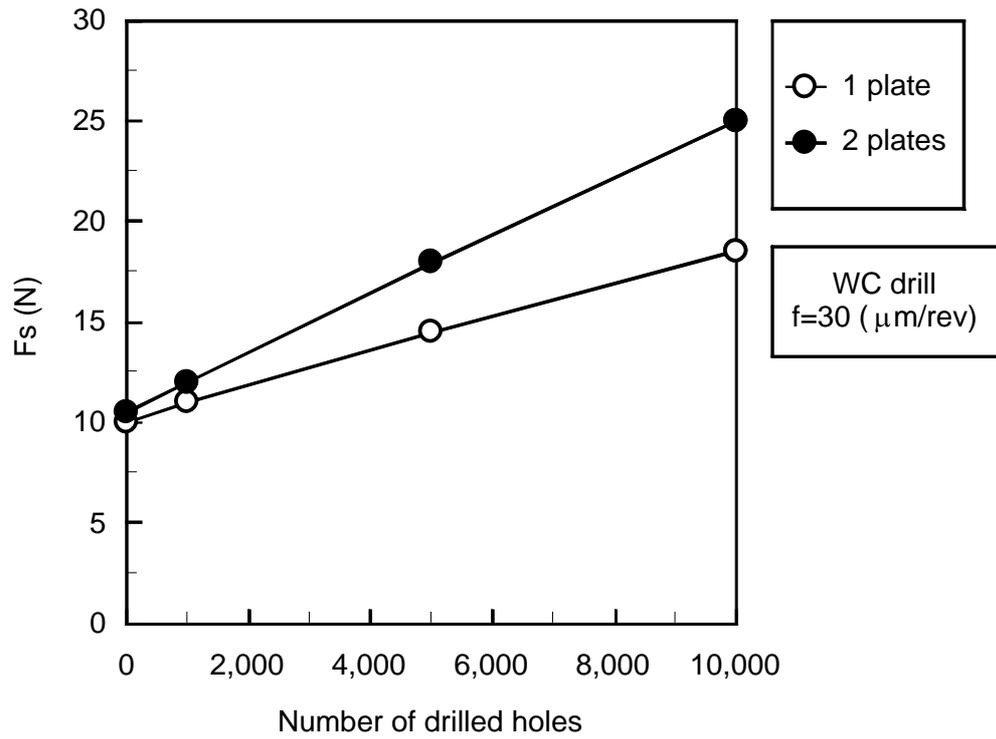


Fig.7-5 Relation between  $F_s$  and number of drilled holes.

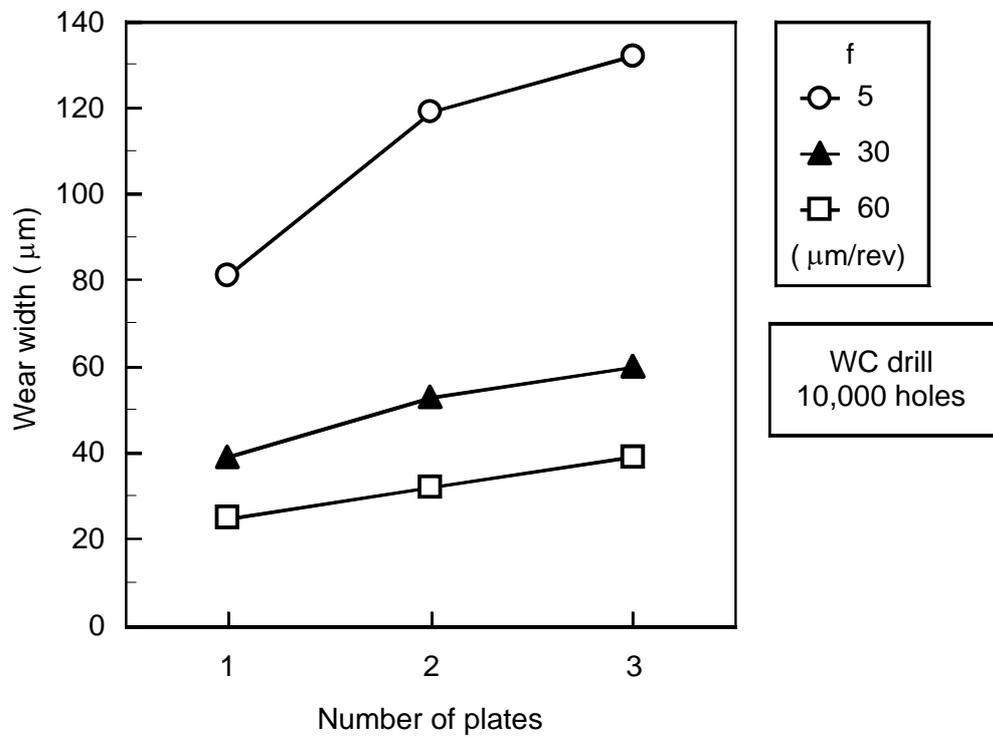
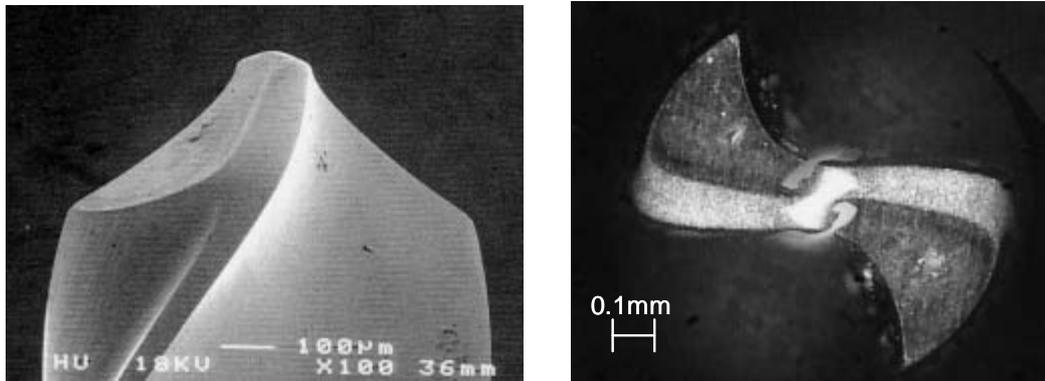
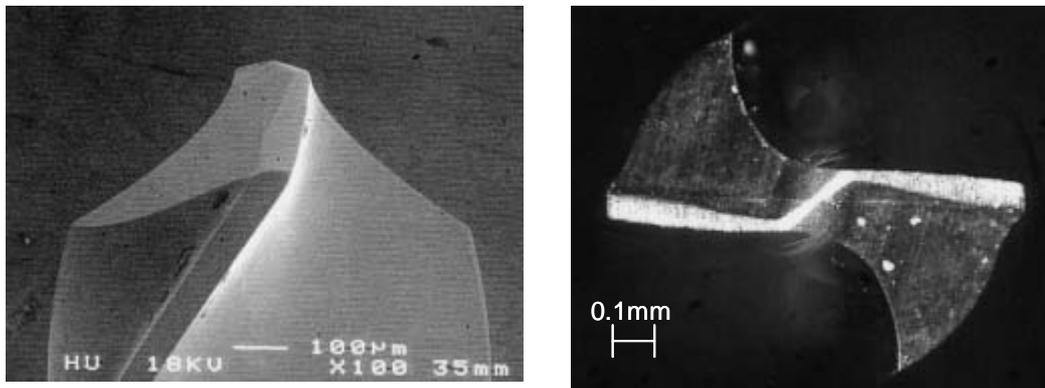


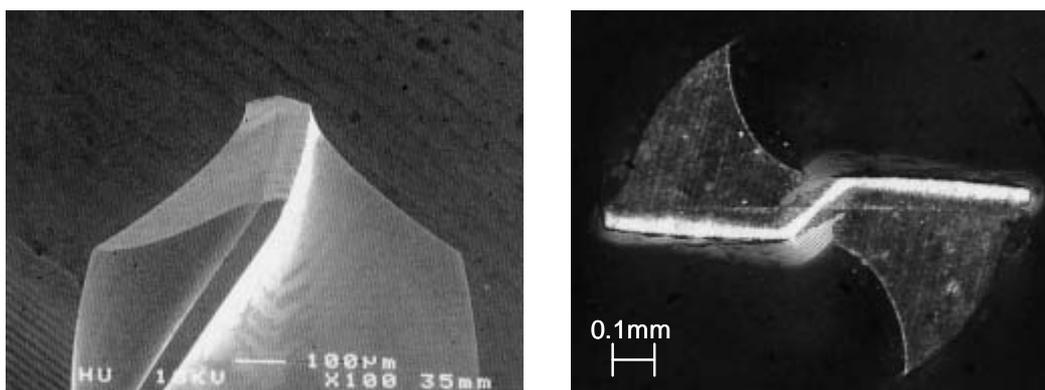
Fig.7-6 Relation between wear width and number of plates.



(a)  $f=5$  ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )



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



(c)  $f=60$  ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )

Fig.7-7 Micrographs of WC drill (2 plates, 10,000 holes).

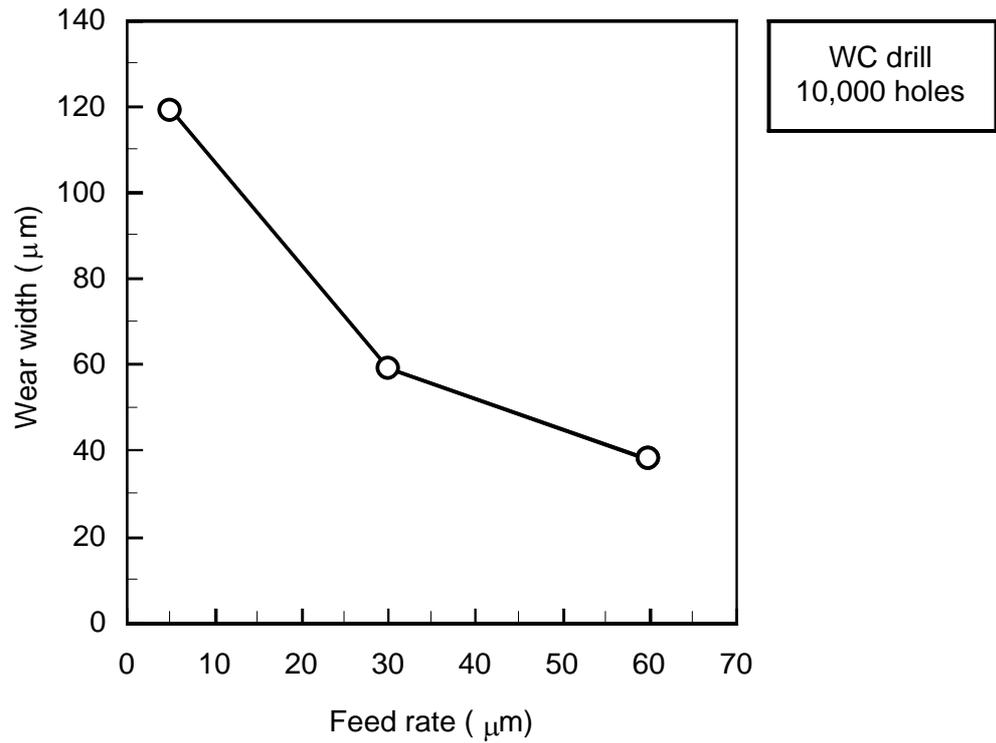


Fig.7-8 Relation between wear width and feed rate.

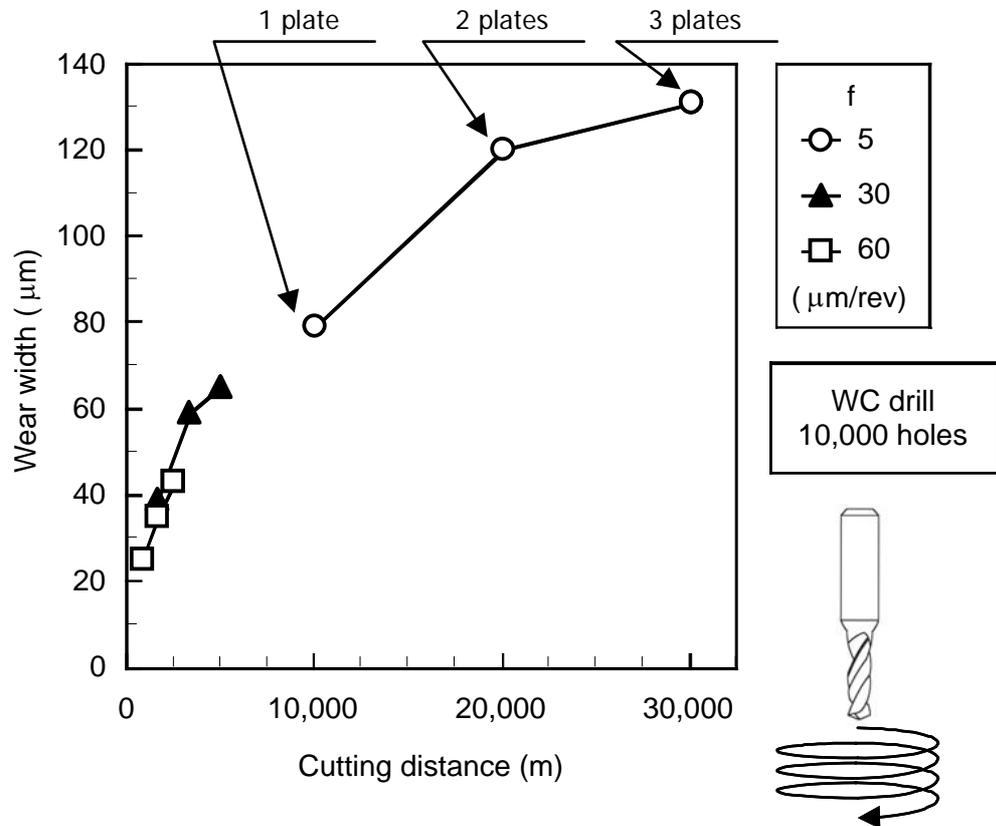


Fig.7-9 Relation between wear width and cutting distance.

摩耗幅の関係を Fig.7-8 に示す . Fig.7-8 より , 送り量の小さい方がスラスト力が小さいにも関わらず , ドリルをより摩耗させていることが分かる . そこで , 送り量別のドリル外周の切削距離と摩耗幅の関係を Fig.7-9 に示す . Fig.7-9 において , 例えば送り量  $5\mu\text{m}$  の3つのプロット点は , 切削距離が短い方から重ね枚数を 1 枚 , 2 枚 , 3 枚として実験を行なったときのものである . Fig.7-9 より , 送り量が小さいほど切れ刃の円周方向の切削距離に大きく影響されていることが分かった .

### 7-3-3 工具摩耗と加工穴品質

本項では , 工具摩耗が加工穴品質に及ぼす影響について考察する . まず , 加工穴の内部損傷に与える影響について調べる . Fig.7-10 に一層材の透過光写真を示す . Fig.7-10 (a) の加工回数初期段階では , 加工穴周辺の内部損傷はほとんど観察されず , 良好な加工穴であることが分かる . Fig.7-10 (b) より加工回数が増加すると , 加工穴周辺に内部損傷が大きく発生しているのが観察され , 加工穴品質が著しく悪化している . また , Fig.7-10 (b) のA部において , 縦糸方向だけでなく横糸方向に沿っても内部損傷が発生しているのが観察される . これまでの結果 ( 例えば Fig.2-14 ) では , 回転角  $45\text{deg}$  . 付近では繊維角  $45\text{deg}$  . 及び  $135\text{deg}$  . の繊維が存在しており , 内部損傷は繊維角  $45\text{deg}$  . の繊維に沿って進行していることを確認している . Fig.7-10 (b) の顕微鏡写真ではこれまでの結果とは異なる発生形態を示している . したがって , 摩耗した工具による加工では , 摩耗していない工具による内部損傷の発生メカニズムと異なると考えられる .

Fig.7-11 に加工回数ごとの損傷幅と回転角の関係を示す . 送り量の小さい Fig.7-11 (a) より , 加工回数初期段階では損傷幅は小さく , また回転角毎の損傷幅にほとんど差が見られず良好な結果である . 加工回数が増加するにつれて , 損傷幅が増大する傾向が見られるが , 5000 穴までは損傷幅の異方性が小さい . 送り量の大きい Fig.7-11 (b) の場合 ,

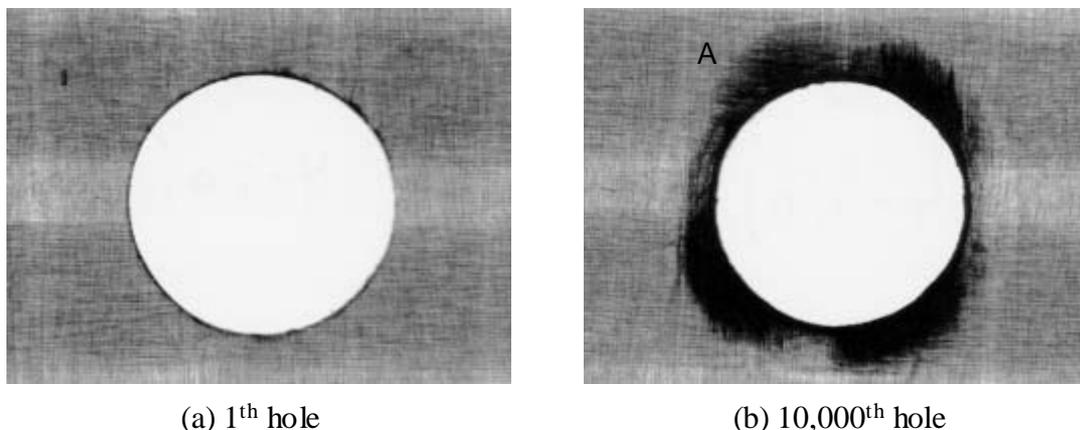
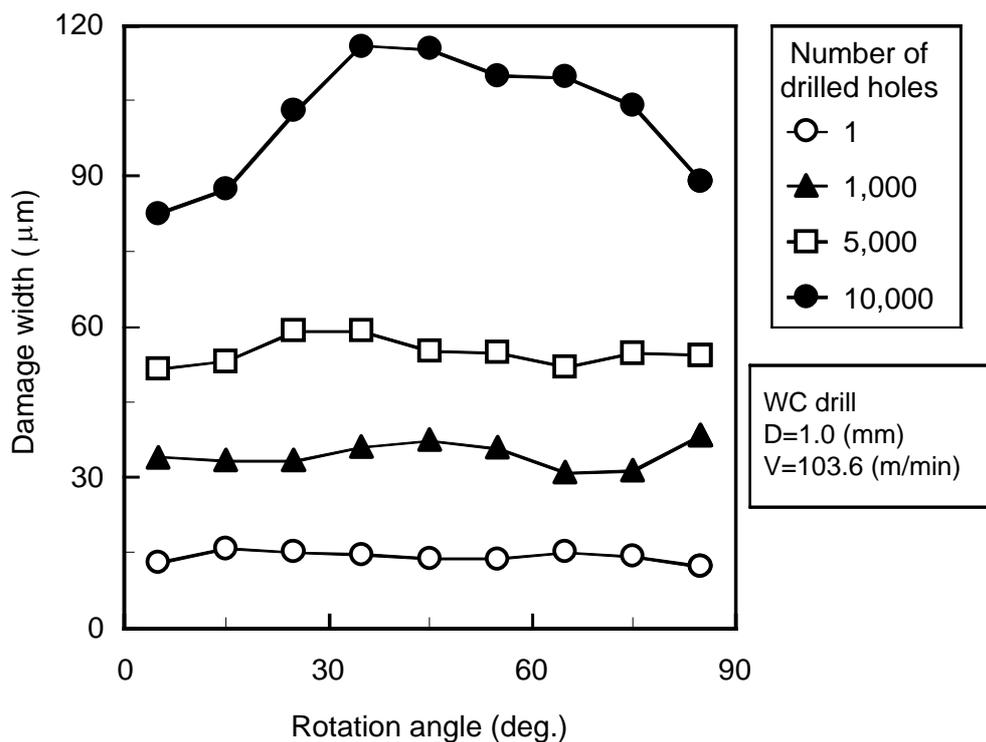


Fig.7-10 Micrographs of drilled lamina ( $f=5\mu\text{m}/\text{rev}$ ).

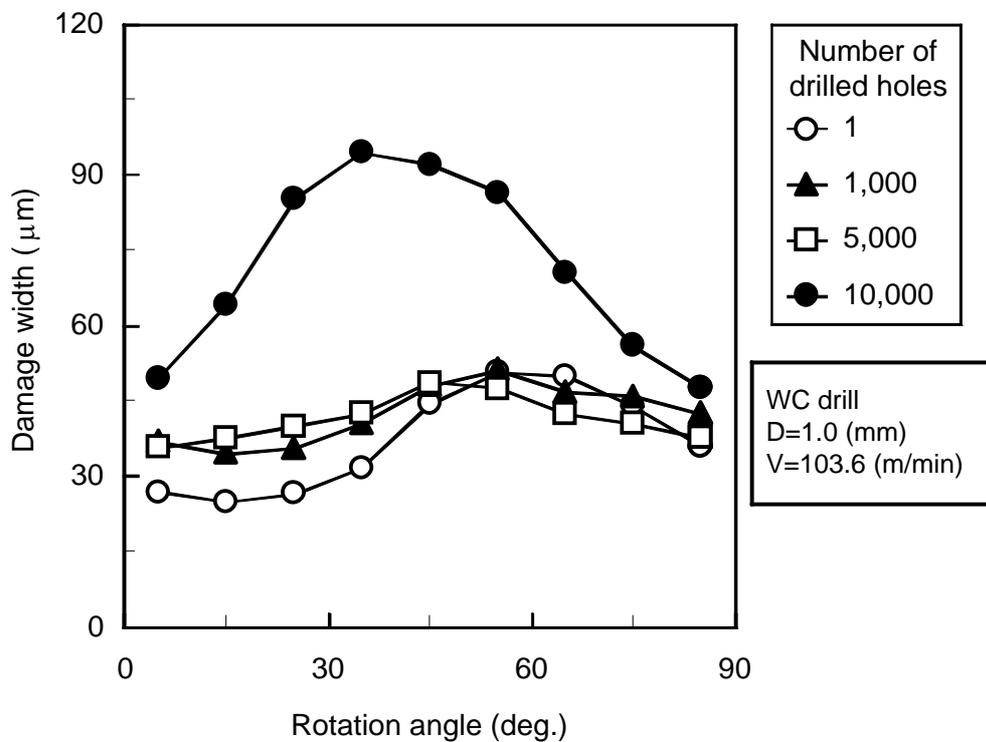
加工回数初期段階では回転角 45deg. ~ 60deg. 付近の損傷幅が他の回転角に比べ大きくなり異方性を示している。5000穴までの損傷幅は加工回数の増加に伴いやや増加傾向が見られるがその差は 10 $\mu$ m 程度である。しかし、5000穴と 10,000穴の損傷幅を比べるとその差が大きくなるのが分かる。また、10,000穴の損傷幅は回転角 45deg. ~ 60deg. 付近で他の回転角よりも大きくなり異方性を示している。Fig.7-11(a)と(b)の10,000穴の損傷幅を比較すると、どちらも回転角 45deg. 付近で極大値を示しており、送り量の小さい場合の方が大きくなるが、異方性については送り量の大きい場合の方が大きくなる。

次に加工穴品質の信頼性を調べるために、各加工回数毎の損傷幅の相対度数を求めた。その結果を Fig.7-12 に示す。送り量の小さい Fig.7-12(a) より、加工回数初期段階で損傷幅 10 $\mu$ m ~ 30 $\mu$ m の相対度数がほとんどを占めており、損傷幅のばらつきが少ないことが分かる。しかし、加工回数が増加するほど損傷幅のばらつきは大きくなり、特に 10,000 穴目の損傷幅のばらつきは非常に大きく加工穴品質の信頼性が著しく低下することが言える。送り量の大きい Fig.7-12(b) より、加工回数の初期段階に注目すると、損傷幅は 10 $\mu$ m ~ 80 $\mu$ m の範囲でばらついている。加工回数が増加すると 5000 穴目までは相対度数にほとんど変化は見られない。しかし、加工回数が 10,000 穴目になると損傷幅のばらつきはいくらか大きくなるのが分かる。Fig.7-12(a) , (b) を比較すると、加工回数の初期段階では送り量が小さい方が損傷幅のばらつきが小さく、加工穴品質の高い信頼性が得られ良好な結果となる。しかし、加工回数が増加するにつれて、送り量の小さい損傷幅のばらつきは大きく変化するのに対し、送り量の大きい損傷幅のばらつきの変化は小さいことが言える。

損傷幅の異方性を調べるために各加工回数ごとに 100 サンプルの損傷幅の平均値、100 サンプル中の最大値及び最小値を Fig.7-13 に示す。送り量の小さい Fig.7-13(a) より、損傷幅の平均値及び最大値は加工回数の増加に伴い大きくなる。加工回数初期段階での損傷幅の平均値は約 15 $\mu$ m であり、加工回数 10,000 穴目の損傷幅の平均値は約 100 $\mu$ m となりおよそ 6.5 倍大きくなる。損傷幅の最大値は加工回数初期段階では約 50 $\mu$ m で、加工回数が 10,000 穴目になると約 200 $\mu$ m となり、およそ 4 倍大きくなる。また、損傷幅の最小値は加工回数が増加してもほとんど変化しないことから、損傷幅の異方性(最大値と最小値との差)は加工回数が増加するほど非常に大きくなるのが分かる。送り量の大きい Fig.7-13(b) より、損傷幅の平均値は加工回数初期段階で約 35 $\mu$ m であり、加工回数が 10,000 穴目では約 70 $\mu$ m となり、およそ 2 倍大きくなる。損傷幅の最大値は加工回数初期段階で約 120 $\mu$ m で加工回数が 8,000 穴目までほとんど変化が無く、10,000 穴目で約 180 $\mu$ m となり、加工回数初期段階に比べおよそ 2.5 倍大きくなる。損傷幅の最小値は加工回数が増加しても変化は見られず、損傷幅の異方性は 8,000 穴目まではほとんど変化せず、送り量を 60 $\mu$ m/rev とした場合、加工穴数 8000 穴が工具寿命と考えられる。

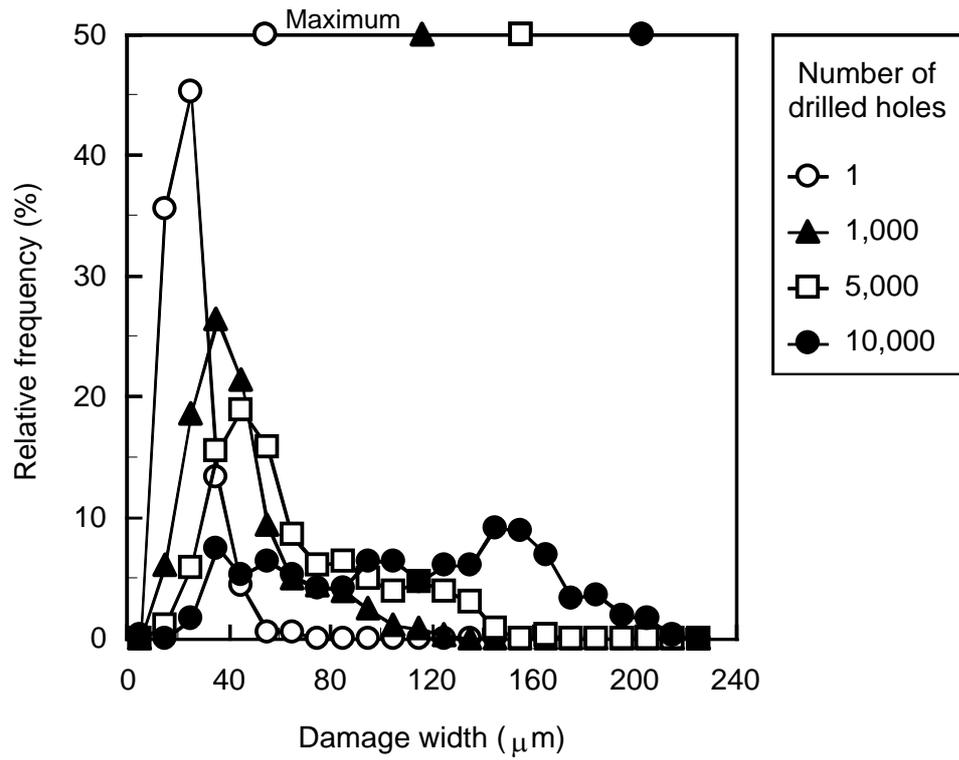


(a) f=5 (μm/rev)

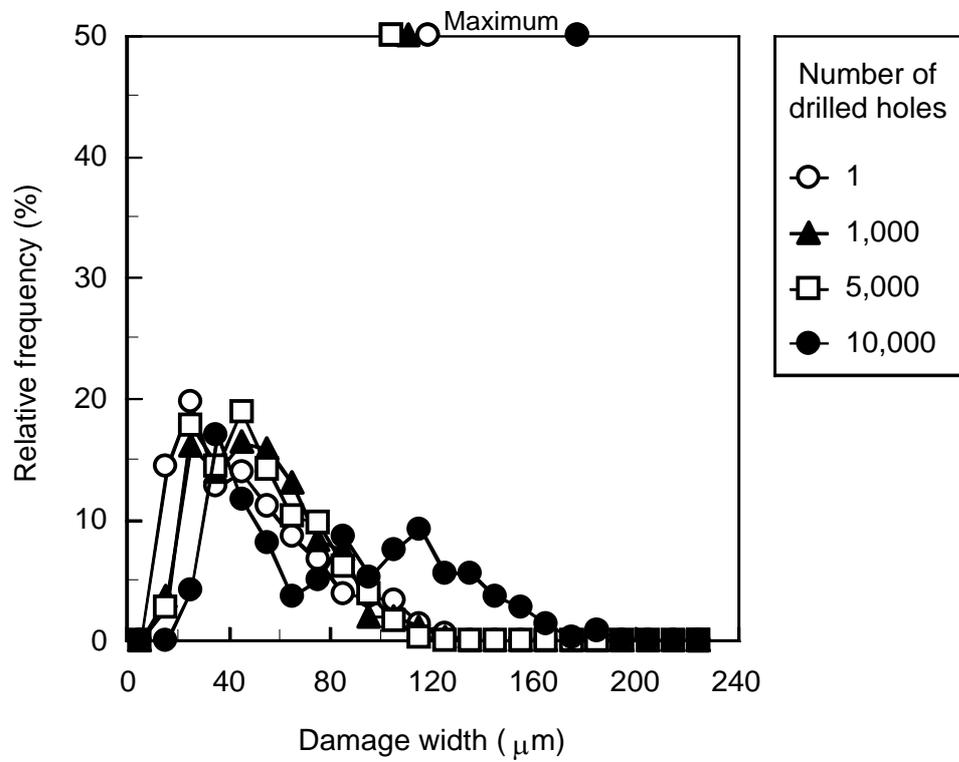


(b) f=60 (μm/rev)

Fig.7-11 Relation between damage width and rotation angle.

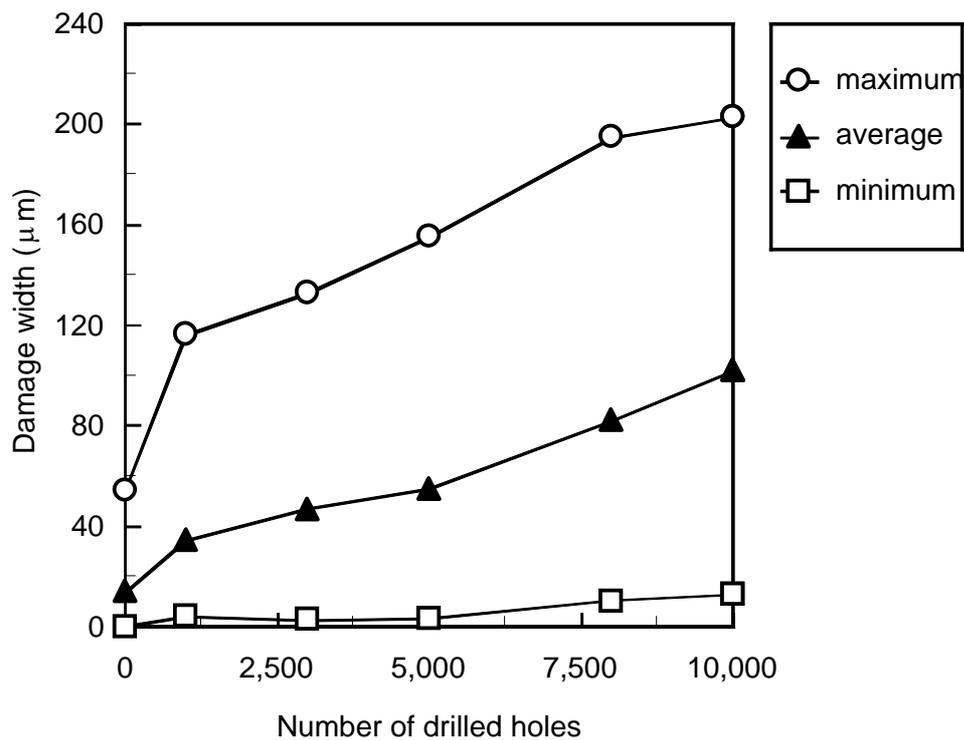


(a)  $f=5$  ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )

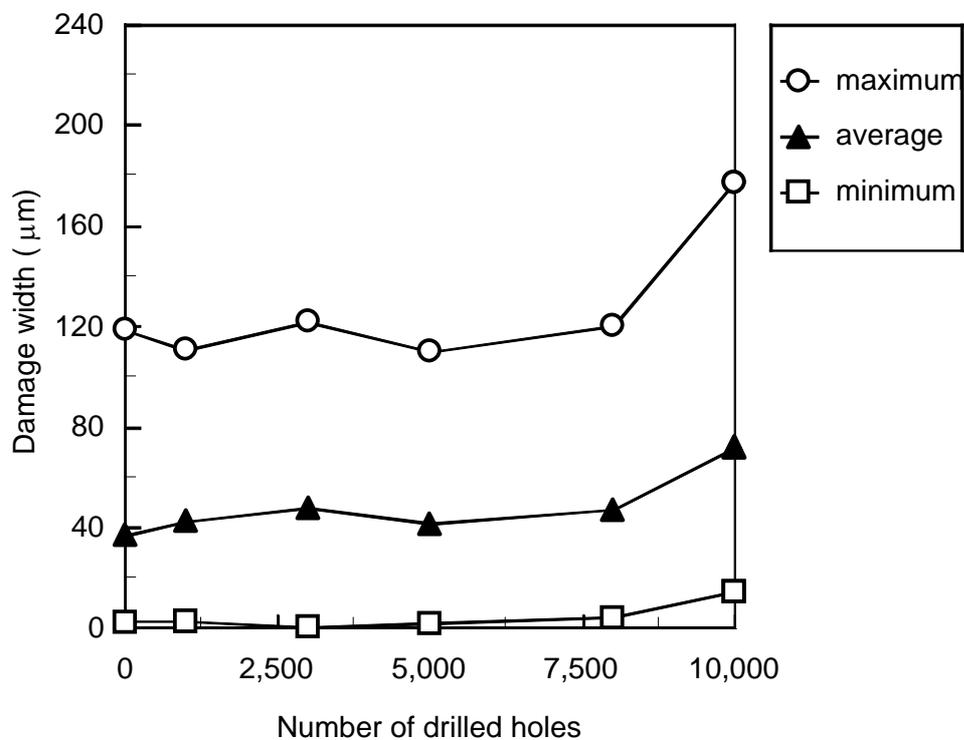


(b)  $f=60$  ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )

Fig.7-12 Relation between relative frequency and damage width.



(a) f=5 (μm/rev)



(b) f=60 (μm/rev)

Fig.7-13 Maximum, average and minimum damage width.

Fig.7-11 ~ Fig.7-13より送り量を大きく設定すると,加工回数初期段階では損傷幅,損傷幅の異方性及び損傷幅のばらつきは送り量の小さい時に比べ大きくなるが,加工回数が増加してもそれらの値の変化は小さく,加工回数初期段階での加工穴品質を維持している.加工能率を考慮すると送り量が大きいほど短時間に多数の穴が加工されることになり,より実用的であると考えられる.一方,加工条件を小さい送り量に設定すると,加工回数初期段階では損傷幅,損傷幅の異方性及び損傷幅のばらつきが小さく良好な加工穴品質が得られるが,加工回数が増加するに伴い,それらの値は増大し加工穴品質が著しく低下する.これは壁面生成繊維の影響であると考えられる.Fig.7-14に摩耗無しドリルと摩耗したドリルの先端部を切れ刃と垂直の側面方向から観察した時の模式図を示す.ここで壁面生成繊維とは,6-3-5節でも定義したようにドリルが1回転あたりに

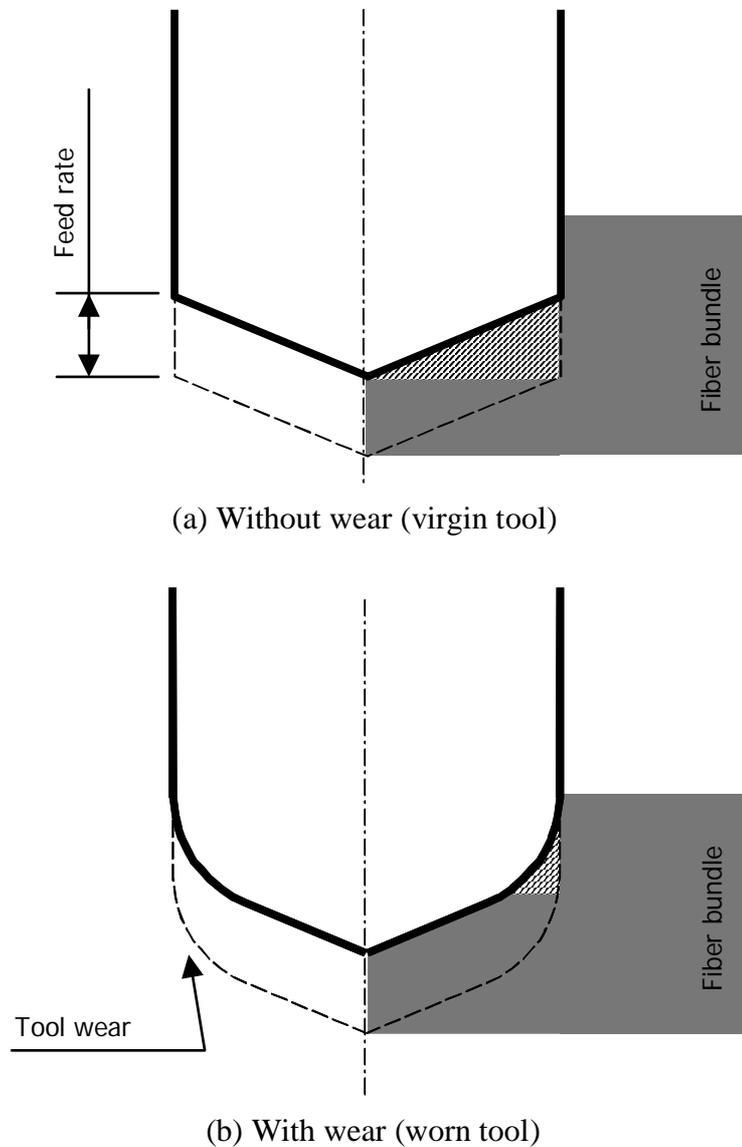


Fig.7-14 Drilling process of cutting edge on abrasion drill.

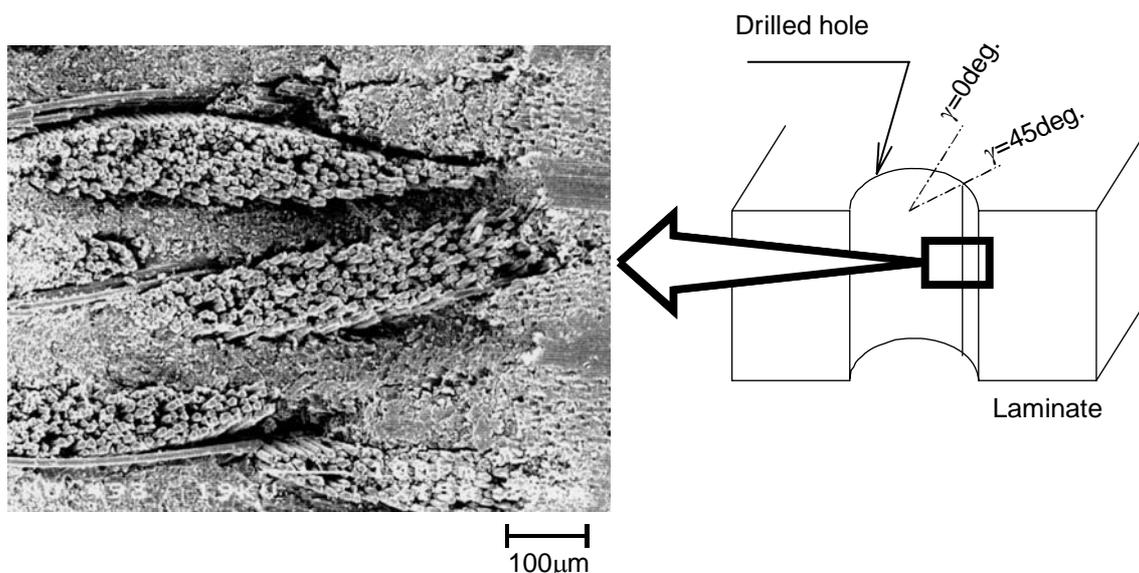


Fig.7-15 SEM micrograph of drilled laminate surface.

穴壁面を生成するとき切削する繊維 (Fig.7-14の斜線部) である。水平方向の壁面生成繊維の長さに注目すると摩耗したドリルの壁面生成繊維の長さが非常に短いことが分かる。これはFig.6-15(b)のボールエンドミルによる壁面生成繊維とほぼ同様な状態である。繊維が曲げモーメントによる応力で切断されるとすれば、壁面生成繊維の長さが短いほど繊維切断に要する力は大きくなる。したがって、繊維切削時に繊維と樹脂の界面に作用する力は大きくなる。さらに、送り量が $5\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合は、鈍化して丸みを帯びた肩部周辺で何度も同じ繊維に接触することになる。そのため送り量が $5\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合には $60\mu\text{m}/\text{rev}$ の場合よりも繊維切断時に大きな力が加わるとともに、工具との接触回数も増えることでガラス繊維とエポキシ樹脂間ではく離や掘り起し等の大きな損傷が生じるものと考えられる。加工穴数初期段階での内部損傷の発生形態はFig.2-14に示すように繊維角 $30\text{deg}$ .の繊維に沿って進行する。しかし、工具摩耗により工具肩部が鈍化し丸みを帯びると壁面生成繊維の影響により、回転角 $30\text{deg}$ .付近で繊維角 $30\text{deg}$ .方向の繊維だけでなく、繊維角 $120\text{deg}$ .方向の繊維に沿っても内部損傷が進行したと考えられる。このときの加工穴断面をFig.7-15に示す。Fig.7-15より、掘り起しに加え樹脂と繊維束間の層間での界面はく離も発生しているのが分かる。また、十分に切削されず切り残しと考えられる繊維の突出も存在する。したがって、工具摩耗による繊維の切り残しが内部損傷の場合と同じように加工穴表面状態にも影響を与え、表面状態を非常に粗くすることが分かった。この表面状態はスルーホール加工の次工程であるメッキ工程において、メッキ密着性の低下や不連続メッキの原因となり、加工穴品質の信頼性を著しく低下させるものである。

プリント基板におけるドリル加工では、ドリルの曲がりによる穴位置精度の誤差が高

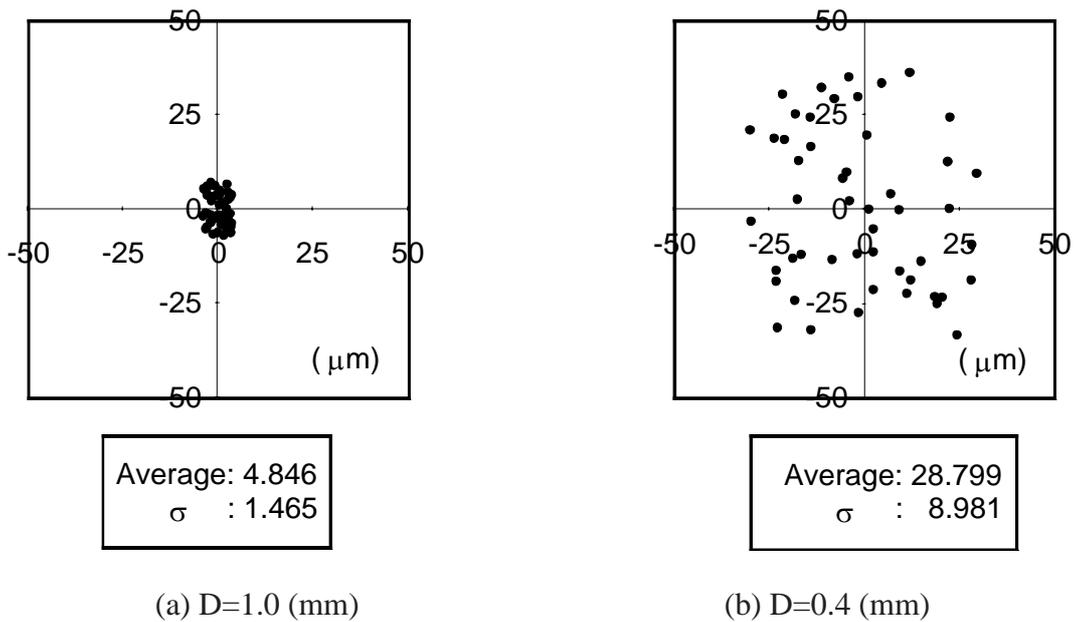


Fig.7-16 Hole position of exit side.  
(WC drill, 5000holes, S=33,000rpm, f=60μm/rev)

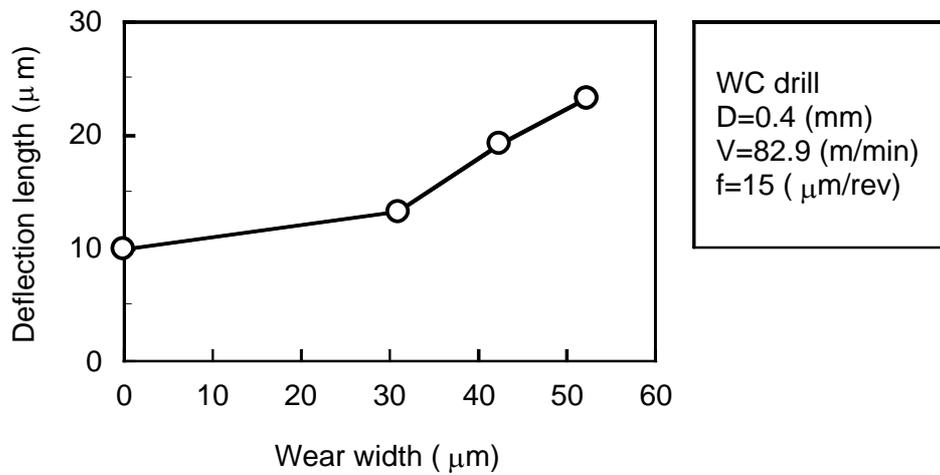


Fig.7-17 Relation between deflection length and wear width.

実装密度化の進む基板において重要な問題となる。穴あけ加工時にこの曲がりが大きくなると隣接するランド同士の接触やランドからの穴のはみ出しなどが発生し無視できない問題となってきている。したがって、加工穴品質の観点から、穴位置精度も重要な評価項目であるといえる。そこで、ドリル摩耗が加工穴の曲がりおよび影響について調べた。Fig.7-16にφ0.4mm及びφ1.0mmのコート無ドリルの摩耗時において、入口部の加工穴中心座標を(0,0)とした時の出口部の加工穴中心座標を示す。曲がり量については各値を平均し標準偏差を加えたもの(Average+σ)をばらつきの範囲として評価した。

Fig.7-16より， $\phi 0.4\text{mm}$ の方が $\phi 1.0\text{mm}$ に比べ曲がり量が大きいことが分かる．この原因を以下に考察する．ドリルのシャンクから先を中実丸軸の片持ち梁（長さ $l\text{mm}$ ）として近似し先端に集中荷重 $F$ を受ける時の先端のたわみ $w$ は次式となる．

$$w = \frac{Fl^3}{3EI} \quad \text{ここで} \quad I = \frac{\pi}{64}d^4$$

ここで $E$ はヤング率， $I$ は断面二次モーメントである．ドリル先端に作用する集中荷重は $\phi 1.0\text{mm}$ の場合と比べると $\phi 0.4\text{mm}$ の同条件におけるスラスト力は約 $1/3$ である．切削力の合力の方向はドリル径によらず一定と仮定するとドリル先端に作用する軸に垂直方向の力も $\phi 0.4\text{mm}$ は $\phi 1.0\text{mm}$ の $1/3$ と考えられる．そこで，ドリルの軸方向の力であるスラスト力のたわみに対する影響を無視すると， $\phi 0.4\text{mm}$ のたわみは $\phi 1.0\text{mm}$ の約4倍になる．Fig.7-16における $\phi 0.4\text{mm}$ の曲がり量を4倍すると，おおよそ $\phi 1.0\text{mm}$ の曲がり量と一致する．よってドリル径が $\phi 0.4\text{mm}$ になると，刃長が $\phi 1.0\text{mm}$ よりも短くなっても曲げ剛性の差で曲がり量は $\phi 1.0\text{mm}$ より大きくなる．また，本考察に使用した加工条件は最も曲がり量の大きいものであったが，同じ加工条件でも $\phi 1.0\text{mm}$ での曲がり量はほとんど見られなかった．したがって，曲がり量による評価は差の出る $\phi 0.4\text{mm}$ のドリルにより行った．

Fig.7-17は $\phi 0.4\text{mm}$ コート無ドリルの摩耗幅と曲がり量の関係を示したものである．Fig.7-17より，摩耗幅の増加に伴い曲がり量も大きくなる傾向を示している．摩耗量が増加するとスラスト力が増大し，また食い付き時の歩行現象も大きくなるため穴の曲がりは大きくなり穴位置精度を低下させるものと考えられる．

## 7-4 ダイヤモンドコートドリルの特性

### 7-4-1 コートドリルの特徴

前節ではコート無ドリルの摩耗による刃先形状の変化が加工穴品質に及ぼす影響を明らかにした．本節では，耐摩耗性の向上による加工穴品質の安定を目指して開発されたダイヤモンドコートドリルの特性を明らかにする．

Fig.7-18は各送り量におけるコート無ドリルとダイヤモンドコートドリルでの加工穴数と $F_s$ の関係を示したものである．Fig.7-19はコート無ドリルとダイヤモンドコートドリルでの加工穴数と摩耗幅の関係を示したものである．Fig.7-20はドリル肩部の拡大SEM写真である．Fig.7-18より，加工穴数の増加に伴い， $F_s$ の値は増加しコーティングの有無で $F_s$ の値の増加傾向が異なる．コート無ドリルではコートドリルに比べて加工穴数が増加するほど， $F_s$ の値は急増する．これは，Fig.7-19に示すように，コート無ドリルの摩耗幅がコートドリルに比べ加工穴数の増加に伴い急増するためと考えられる．ま

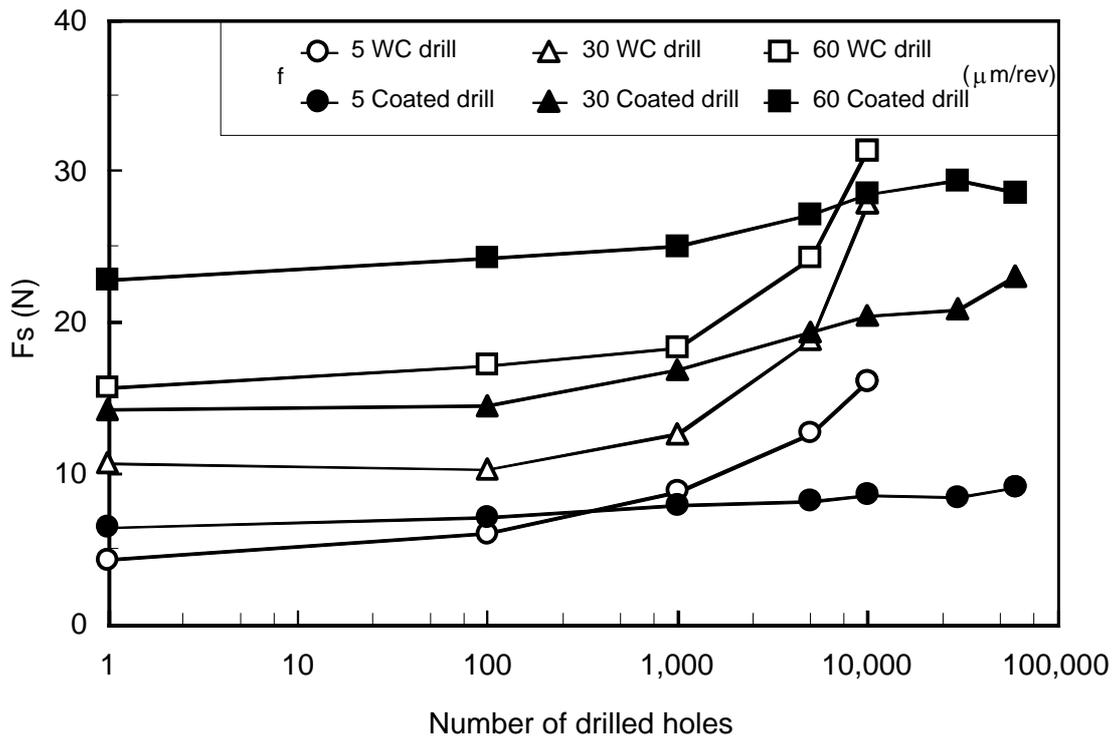


Fig.7-18 Relation between  $F_s$  and number of drilled holes.

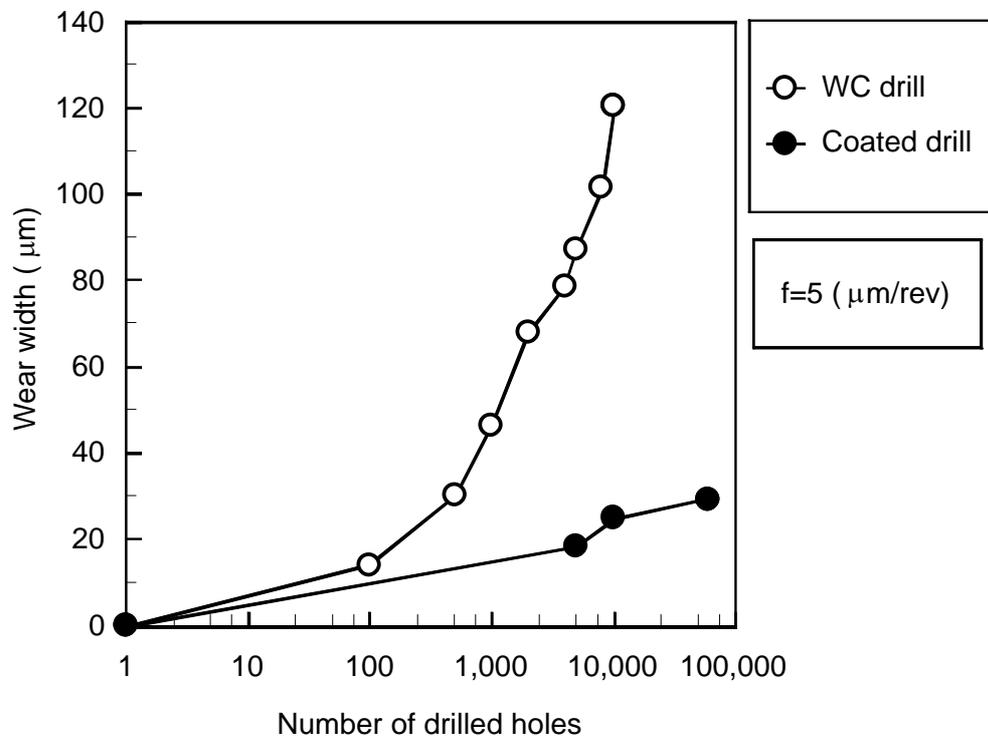
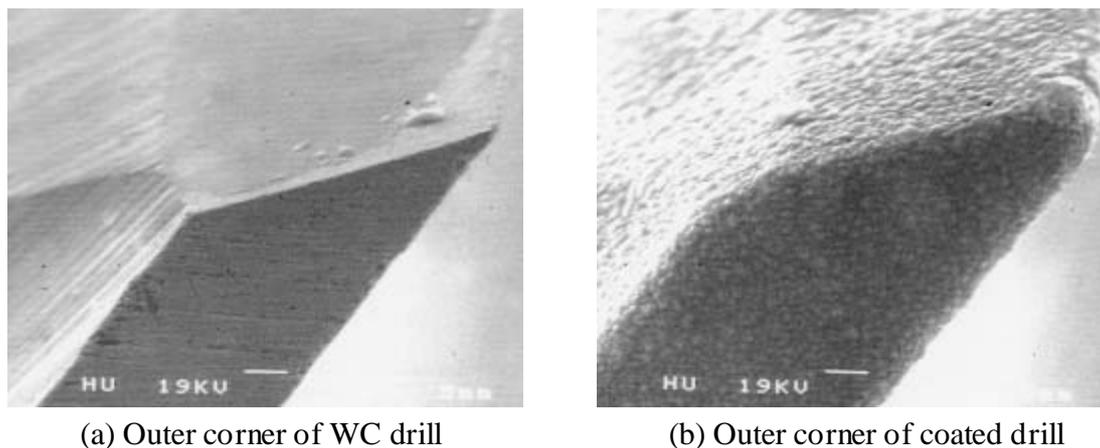


Fig.7-19 Relation between wear width and number of drilled holes.



(a) Outer corner of WC drill

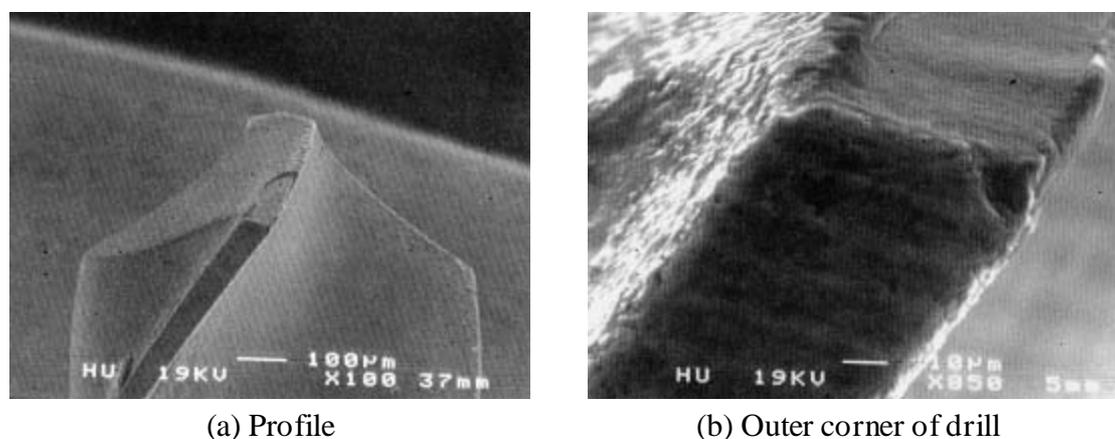
(b) Outer corner of coated drill

Fig.7-20 SEM micrographs of outer corner of drill (virgin tool).

たFig.7-18で、加工穴数が少ない段階でのコートドリルのFsの値は、コート無ドリルに比べて大きな値となることが分かる。これは、Fig.7-20に示すように、ドリル先端部に10 $\mu$ m程度のダイヤモンド膜が施された結果、コートドリルの刃先が最初から丸みを帯びているためと考えられる。しかし加工穴数が増加すると、コート無ドリルはFig.7-19のように摩耗幅が急激に大きくなりスラスト力を増大させるのに対し、コートドリルではダイヤモンド膜の効果により摩耗幅の変化はほとんど見られない。

さらにFig.7-18より、コートドリルのFsの値とコート無ドリルのFsの値が入れ替わるのは約10,000穴以内であり、その交差点は送り量が小さいほど穴あけ回数の少ない位置となる。したがって、コートドリルは切れ刃の円周方向の切削距離が多い、より耐摩耗性の必要な切削条件（低送り、高回転）で優位性を発揮することが分かる。

Fig.7-21は60,000穴後のコートドリルのSEM写真である。この写真よりダイヤモンド膜が剥がれている部分を確認できる。ダイヤモンド膜が剥がれていてもスラスト力を一定に切削が続けられるのは、逃げ面側のコーティングが剥がれても、すくい面側のコー



(a) Profile

(b) Outer corner of drill

Fig.7-21 SEM micrographs of coated drill.

ティングは剥がれず残っていたため、すくい面側の膜により切れ刃のダレが抑制されるためと考えられる。

#### 7-4-2 コートドリルによる加工穴品質

本項ではダイヤモンド膜が加工穴品質に与える影響を調べる。Fig.7-22はコートドリルでの加工穴数と損傷幅の関係を示したものである。Fig.7-22より加工回数初期段階では、どの回転角でも損傷幅は $25\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ の範囲となり異方性が少なく非常に良好な加工穴であることが分かる。加工回数が10,000穴目までの損傷幅は加工回数初期段階での損傷幅とほとんど変わらず、良好な結果が得られた。加工回数60,000穴目の損傷幅は $30\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ の範囲で加工回数初期段階に比べてやや悪化するが、その差は $10\mu\text{m}$ 程度であり良好な結果であると言える。また、コート無ドリルの損傷幅の結果であるFig.7-11(a)と比較すると、Fig.7-11(a)では加工回数の増加に伴い損傷幅は増大し加工穴品質が著しく悪化するが、コートドリルの結果であるFig.7-22の損傷幅は加工回数が60,000穴に達してもほとんど変化がなく、加工穴数の増加による損傷幅の増大を極めて効果的に抑えられた。

次にコートドリルによる加工穴品質の信頼性を調べるために、加工穴周辺に発生する損傷幅の相対度数を求めた。Fig.7-23は加工回数毎の損傷幅の相対度数を示したもので

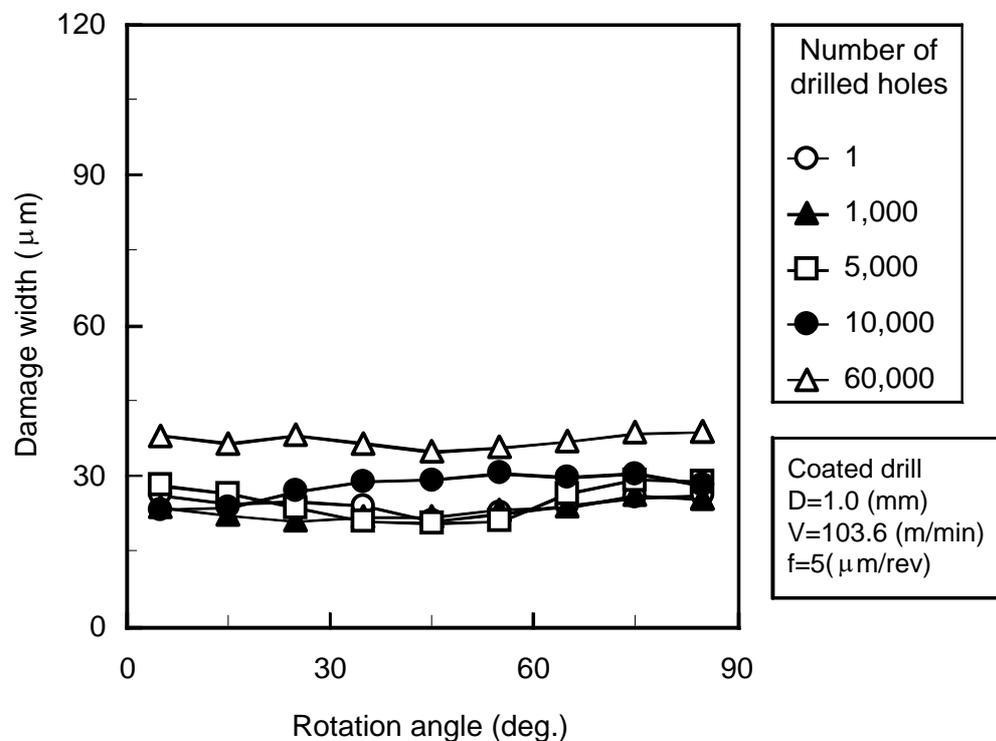


Fig.7-22 Relation between damage width and rotation angle.

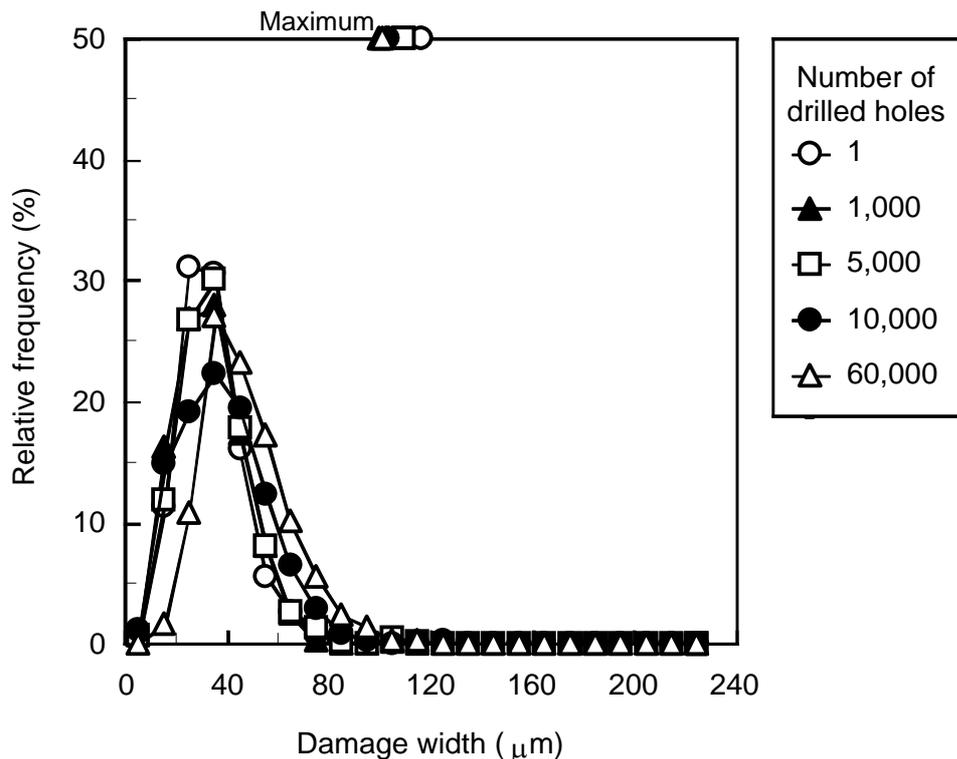


Fig.7-23 Relation between relative frequency and damage width.

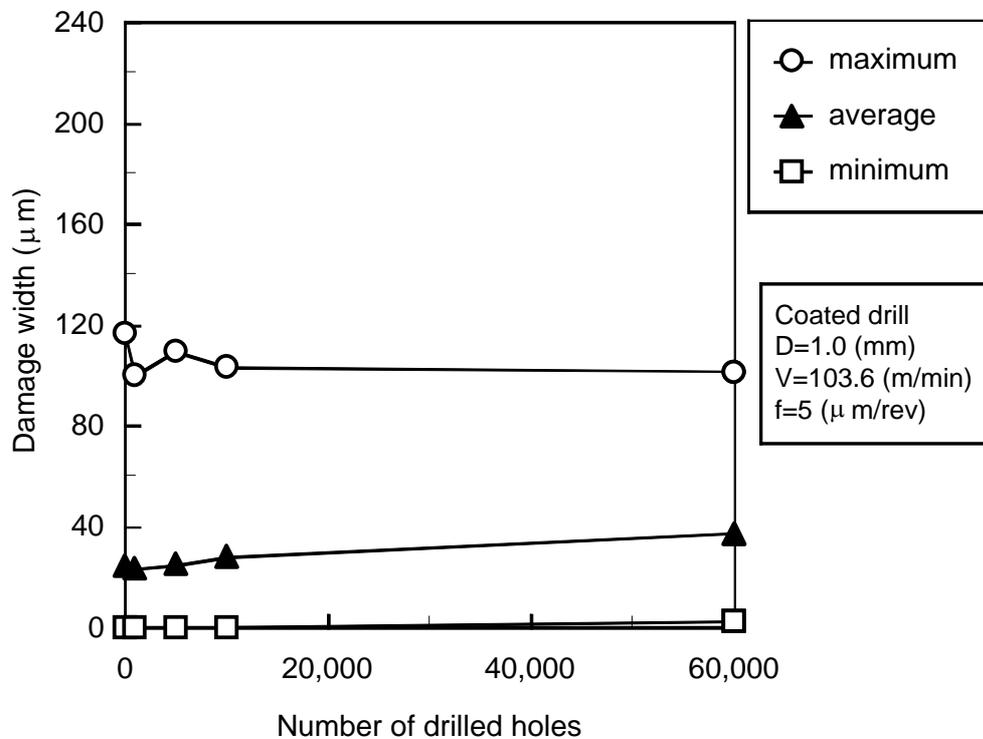


Fig.7-24 Maximum, average and minimum damage width.

ある。Fig.7-23より加工回数初期段階では、損傷幅は $30\mu\text{m}$ ～ $50\mu\text{m}$ の相対度数がほとんどを占めており損傷幅のばらつきは少ないことが分かる。加工回数が増加してもその傾向はほとんど変化せず、加工回数が60,000穴に達しても加工回数初期段階の加工穴品質の信頼性を維持している。コート無ドリルによる結果であるFig.7-12(b)と比較してもコートドリルによる加工穴品質の信頼性が高いことが言える。

コートドリルによる加工穴周辺に発生する損傷幅の異方性を見るために加工回数毎の損傷幅の平均値、最大値、最小値を求めた結果をFig.7-24に示す。Fig.7-24より加工回数初期段階では損傷幅の最大値は約 $120\mu\text{m}$ 、平均値は約 $25\mu\text{m}$ 、最小値は約 $1\mu\text{m}$ である。加工回数が増加しても、これらの値はほとんど変化せず、加工回数が60,000穴に達しても加工回数初期段階での損傷幅の異方性を維持していることが分かる。コート無ドリルの結果であるFig.7-13(a)と比較すると、加工回数初期段階でのコートドリルの損傷幅の最大値及び平均値はコート無ドリルに比べてやや大きい値となる。これは、Fig.7-20の工具肩部のSEM写真より、コート無ドリルに比べてコートドリルの肩部にダイヤモンド膜により最初から僅かな丸みがあるためと考えられる。加工回数が増加するとコート無ドリルの肩部が工具摩耗により丸くなり、コートドリルの肩部の丸みよりも大きくなるために損傷幅が増大すると考えられる。

Fig.7-25に $\phi 0.4\text{mm}$ コートドリルの加工穴数と曲がり量の関係をコート無ドリルと比較して示す。コート無ドリルと比較すると、ドリルが摩耗していない時(初期段階)で

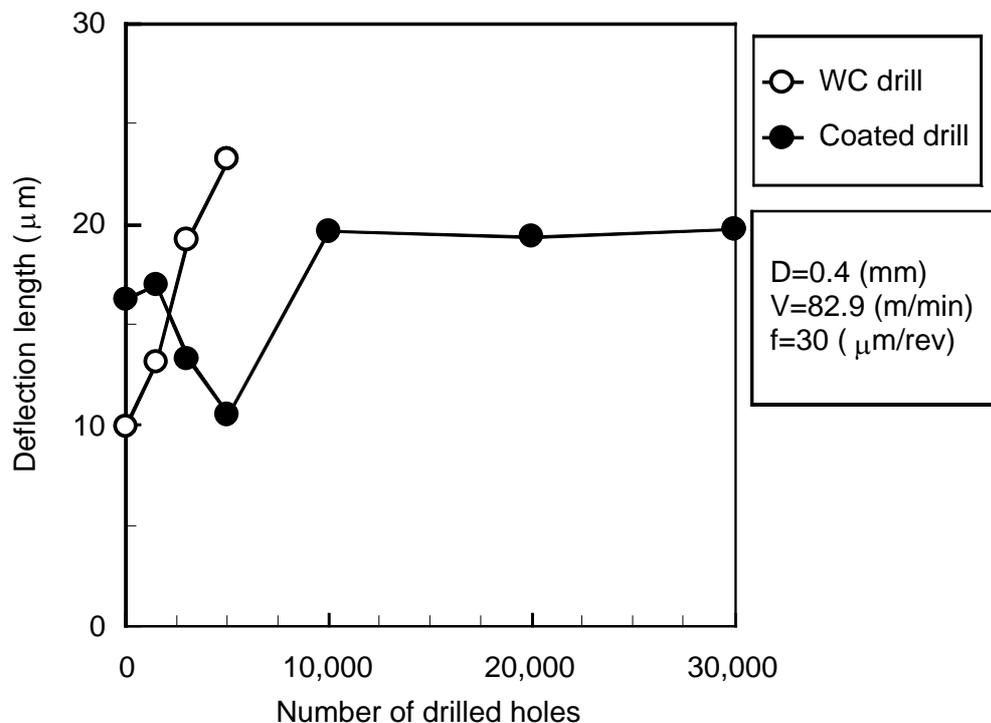


Fig.7-25 Relation between deflection length and number of drilled holes.

は、コートドリルの曲がり量はやや大きい。しかしコート無ドリルが加工穴数の増加と共に曲がり量が大きくなるのに対し、コートドリルでは逆に5,000穴までは曲がり量が減少する傾向が見られ、その後大きくなる。この原因として膜によるドリル表面のざらつき(Fig.7-20(b)参照)が挙げられる。このざらつきのためドリルの食い付き時における歩行現象<sup>[88]-[97],[102]</sup>が大きくなると考えられる。しかし加工穴数の増加に伴いそのざらつきが摩耗により徐々に滑らかになり、ドリルの食い付きも良くなっていくと考えられる。5000穴から曲がり量が増加するのはそこから先は摩耗の影響が大きくなっていくためと考えられる。曲がり量も初期から30,000穴までほぼ一定であるため、加工穴の曲がりにおいてもダイヤモンドコートドリルは有効であることが分かった。

したがって、加工穴数の多い加工に対して、ドリルにダイヤモンドコートを施すことは加工穴品質を維持していく上で非常に有効であることが分かった。

## 7-5 結 言

プリント基板の小径ドリル加工において、ドリルの摩耗が加工穴品質に及ぼす影響を評価した結果を以下の結論として示す。

- (1) ガラスクロス基材エポキシ樹脂積層板のドリル加工において、ドリル摩耗には加工穴数より切れ刃の円周方向の切削距離が大きく影響を与える。
- (2) ドリル摩耗とスラスト力の特徴を考察し、摩耗量の変化をスラスト力の静的成分 $F_s$ で評価できることが明らかになった。
- (3) 内部損傷及び表面粗さなどの加工穴品質においてドリル摩耗が及ぼす影響を評価した。ドリル摩耗はこれらの評価値を大きくし加工穴品質を低下させることを定量的に示した。
- (4) ドリルによる加工穴の曲がりについても評価した。その結果、ドリルの摩耗に伴い穴の曲がり量も大きくなり穴位置精度を悪化させることが分かった。
- (5) ダイヤモンドコートドリルに関してコートが施されていないドリルと比較評価した。その結果、コート膜によって刃先に最初から僅かな丸みがあるために、加工穴数が少ない初期の場合、加工穴品質はコートのないドリルと比べて若干悪いことが判明した。しかし、加工穴数が増加しても非常に優れた耐摩耗性により、初期の加工穴品質を長期間にわたり維持することが分かった。

---

## 第8章

### 結 論

---

本章では、これまで述べてきた各章の結言の要点をまとめ、本論文がこれまでにない新しい研究であることを指摘し、研究によって得られた多くの成果を明確にしている。

本論文では、プリント基板用GFRPの小径ドリル加工時の加工穴品質を新しい手法で評価する方法を構築し、その手法を用いて諸条件（切削条件、切削抵抗、工具形状等）が加工穴品質に及ぼす影響について論じている。

GFRPの切削時の損傷の発生メカニズムは表面だけでなく内部の損傷を考慮する必要がある。画像処理を利用して内部損傷の評価方法を提案し、定量的に損傷を調査できるシステムを構築した。このシステムにより、内部損傷の発生形態の傾向を明らかにし、加工穴品質の信頼性を調査した。また、表面損傷と内部損傷の発生形態を比較し、それぞれの発生メカニズムを解明した。さらに、工具の摩耗を加工穴数毎に調べ、工具摩耗が加工穴品質に及ぼす影響を明確にした。

第2章から第7章までに得られた結果を総括すると以下の通りである。

第2章では、ガラス繊維とエポキシ樹脂の光透過性に着目し、ガラスクロス一層材を使用することにより加工穴周辺に発生する内部損傷を評価するために、画像処理システムを提案し構築した。まず、一層材の内部損傷の顕微鏡写真を観察しその発生形態に大きなばらつきがあることを示した。次に、画像処理を使用した評価方法により、今までの超音波顕微鏡によるGFRPの内部損傷の観察と比較して、明確に観察され迅速に、定量的及び統計的に処理可能であることと、そのシステムの概要及び処理方法について述べた。また、切削方向とガラス繊維方向の関係に着目して加工穴の壁面の位置を定義することにより、加工穴毎の内部損傷の発生形態を明確にし、画像処理を利用することにより、内部損傷が高精度で定量的に処理可能であることを証明した。さらに、同一条件で加工された加工穴のいくつかの内部損傷を画像処理により定量化して、その発生形態を

比較検討し、統計的手法による内部損傷の評価方法についても述べた。GFRPの小径ドリル加工された加工穴の内部損傷の評価に画像処理を適用することは多数のブランクの損傷を迅速に処理可能であり、定量的な内部損傷の評価に有効であることを示した。

第3章では、加工穴品質として表面粗さを取り上げ、切削条件が表面粗さに与える影響を調べ、さらに表面損傷の発生要因として切削抵抗を測定し、表面粗さと切削抵抗の関係を調べた。その結果、クロス材の穴壁面でドリル送り方向の表面粗さが増大するのは、同一回転角に存在する2つの繊維角の繊維の切削状態に差が生じ、特に回転角30deg.において繊維角30deg.方向の繊維のみが掘り起され、繊維角150deg.方向の繊維は掘り起されないためであることを示した。GFRPの切削時のドリル送り方向の切削抵抗であるスラスト力の特徴を静的成分と動的成分に分けることにより定量的に評価できることを示した。加工穴の表面粗さは切削速度よりも送り量の影響が大きいことがわかり、加工穴品質の改善には送り量を低減することが有効であることが判明した。また、スラスト力の動的成分と静的成分が表面粗さに与える影響を比較した結果、動的成分が大きく影響することが判明した。

第4章では、内部損傷を加工穴品質として取り上げ、クロス材のドリル加工の内部損傷の発生形態の特徴を調べた。まず、ガラスクロス一層材の顕微鏡写真を観察し、第2章で構築した画像処理システムを利用して切削条件が内部損傷に及ぼす影響について調べた。その結果、表面粗さが増大する穴壁面ではガラス繊維とエポキシ樹脂の界面はく離などの損傷が、表面損傷部分からさらに奥深くにガラス繊維に沿って進行していることを確認した。また、切削条件を変化させて内部損傷への影響を調べた結果、内部損傷の異方性は切削速度よりも送り量に大きく影響され、内部損傷のばらつき及び平均値は送り量を低く設定することで低減できることが判明した。さらに、ドリルのチゼル部及び切れ刃部の内部損傷への影響を見るために下穴実験も行い、内部損傷の発生形態及びばらつき度合を明らかにした。

第5章では、第2章及び第4章で示した内部損傷発生形態のばらつきの原因として、ドリル中心位置とガラスクロスの繊維束との相対位置関係に着目し、ドリル中心位置を分類することにより、内部損傷の発生形態の特徴を検討した。加工位置毎のスラスト力を測定し、内部損傷との関係を考察し、さらに、内部損傷の発生要因として切削方向と繊維方向との関係に加え、切削部の繊維束厚さに着目して内部損傷との関係を調べた。その結果、加工穴周辺に発生する内部損傷は加工穴中心が繊維束に対する位置を定義することで、領域ごとの内部損傷の発生形態に特徴があることが分かった。内部損傷は繊維束厚さに大きく影響を受け同一の繊維角であれば、加工穴壁面の繊維束厚さが大きい箇所では内部損傷は増大することが分かった。また、加工穴壁面で繊維束厚さが同じであれば、繊維角45deg.付近で内部損傷は極大値をとり、その傾向は加工時の送り量が大きい

比較検討し、統計的手法による内部損傷の評価方法についても述べた。GFRPの小径ドリル加工された加工穴の内部損傷の評価に画像処理を適用することは多数のブランクの損傷を迅速に処理可能であり、定量的な内部損傷の評価に有効であることを示した。

第3章では、加工穴品質として表面粗さを取り上げ、切削条件が表面粗さに与える影響を調べ、さらに表面損傷の発生要因として切削抵抗を測定し、表面粗さと切削抵抗の関係を調べた。その結果、クロス材の穴壁面でドリル送り方向の表面粗さが増大するのは、同一回転角に存在する2つの繊維角の繊維の切削状態に差が生じ、特に回転角30deg.において繊維角30deg.方向の繊維のみが掘り起され、繊維角150deg.方向の繊維は掘り起されないためであることを示した。GFRPの切削時のドリル送り方向の切削抵抗であるスラスト力の特徴を静的成分と動的成分に分けることにより定量的に評価できることを示した。加工穴の表面粗さは切削速度よりも送り量の影響が大きいことがわかり、加工穴品質の改善には送り量を低減することが有効であることが判明した。また、スラスト力の動的成分と静的成分が表面粗さに与える影響を比較した結果、動的成分が大きく影響することが判明した。

第4章では、内部損傷を加工穴品質として取り上げ、クロス材のドリル加工の内部損傷の発生形態の特徴を調べた。まず、ガラスクロス一層材の顕微鏡写真を観察し、第2章で構築した画像処理システムを利用して切削条件が内部損傷に及ぼす影響について調べた。その結果、表面粗さが増大する穴壁面ではガラス繊維とエポキシ樹脂の界面はく離などの損傷が、表面損傷部分からさらに奥深くにガラス繊維に沿って進行していることを確認した。また、切削条件を変化させて内部損傷への影響を調べた結果、内部損傷の異方性は切削速度よりも送り量に大きく影響され、内部損傷のばらつき及び平均値は送り量を低く設定することで低減できることが判明した。さらに、ドリルのチゼル部及び切れ刃部の内部損傷への影響を見るために下穴実験も行い、内部損傷の発生形態及びばらつき度合を明らかにした。

第5章では、第2章及び第4章で示した内部損傷発生形態のばらつきの原因として、ドリル中心位置とガラスクロスの繊維束との相対位置関係に着目し、ドリル中心位置を分類することにより、内部損傷の発生形態の特徴を検討した。加工位置毎のスラスト力を測定し、内部損傷との関係を考察し、さらに、内部損傷の発生要因として切削方向と繊維方向との関係に加え、切削部の繊維束厚さに着目して内部損傷との関係を調べた。その結果、加工穴周辺に発生する内部損傷は加工穴中心が繊維束に対する位置を定義することで、領域ごとの内部損傷の発生形態に特徴があることが分かった。内部損傷は繊維束厚さに大きく影響を受け同一の繊維角であれば、加工穴壁面の繊維束厚さが大きい箇所では内部損傷は増大することが分かった。また、加工穴壁面で繊維束厚さが同じであれば、繊維角45deg.付近で内部損傷は極大値をとり、その傾向は加工時の送り量が大きい

ほど顕著であることが判明した。加工穴中心が領域Aの場合、切れ刃が回転角45deg.において比切削抵抗が大きな繊維角で繊維束の厚い領域を切削するため、そのときの切削抵抗が大きくなり、回転4次成分を発生する特徴がある。繊維束厚みの大きいガラスクロスによって強化された材料にドリル加工すると、内部損傷が大きく進展する可能性が高いことが判明した。繊維束厚さの異なる材料を加工し内部損傷を評価した結果、損傷は繊維束厚さに比例し、送り量の1/2乗に比例することを明らかにし、このことにより材料に対して最適な切削条件の設定やプリント基板に適した材料開発が可能となる。

第6章では、第5章までは損傷について材料側からの考察であるため、工具形状について考慮し内部損傷を考察した。内部損傷の発生形態の特徴を調べ、切削抵抗との相関を検討した。特に、スラストの時間的変化を詳細に調査し、ドリル加工中の工具先端(チゼル部)と肩部の位置と切削抵抗の関係を考察した。また、工具形状を変化させたときの切削抵抗と加工穴品質への影響も調べた。その結果、クロス材の加工穴周辺に4箇所の内部損傷が発生するという特徴があることが分かった。スラスト力にはドリル1回転当たり4つの極大値(回転4次成分)が発生しており、加工穴周辺の内部損傷と回転4次成分が関連があることが判明した。この回転4次成分はドリルの肩部により大きく発生し、工具の肩部形状によりその形態は影響を受けることが分かった。また、工具の肩部形状の改善が内部損傷の低減に有効であることを示した。

第7章では、加工穴数と工具摩耗及び切削抵抗の関係を調べ、工具摩耗が加工穴品質に与える影響を調べた。また、工具のダイヤモンドコートの有無が工具摩耗及び加工穴品質に及ぼす影響についても検討した。その結果、GFRPのドリル加工における工具摩耗の形態は加工穴数よりも切れ刃の円周方向の切削距離が大きく影響を与えることが判明した。ドリル摩耗とスラスト力の特徴を考察した結果、工具摩耗の変化をスラスト力の静的成分で評価できることを明らかにした。また、工具摩耗は加工穴品質(内部損傷、表面粗さ)に影響を及ぼし、それらの評価値を増大させ加工穴品質が低下することを示した。ダイヤモンドコートドリルによる加工で、コート膜による僅かな丸みのために加工穴数初期段階では、加工穴品質はコート無ドリルに比べ若干悪いことが判明した。しかし、加工穴数が増加すると非常に優れた耐摩耗性により初期の加工穴品質を維持することが分かった。

以上、プリント基板用小径ドリル加工における加工穴の内部損傷の評価に画像処理システムを利用した新しい評価システムを提案し、その手法は内部損傷の評価に有効であることを示した。さらに、表面損傷を切削条件別に詳細に評価したことに加え、内部損傷の発生メカニズムを明らかにし、これらの結果から損傷低減に有効な諸条件を見出した。研究成果は、今後さらに小型化及び高密度化が要求されるであろうプリント基板の製造技術の向上に役立つものと考えられる。

## 参考文献

- [1] Eiichi AOYAMA, Hisahiro INOUE, Toshiki HIROGAKI, Hiromichi NOBE, Youji KITAHARA, Tsutao KATAYAMA, Investigation on Damage in Small Diameter Drilling in GFRP, Proc. Japan-U.S. CCM-VII, Kyoto, (1995), 677-682.
- [2] E. Aoyama, H. Inoue, T. Hirogaki, H. Nobe, Y. Kitahara, T. Katayama, Study on small diameter drilling in GFRP, Composites Structures, (1995), 32, 567-573.
- [3] K. Ogawa, E. Aoyama, H. Inoue, T. Hirogaki, H. Nobe, Y. Kitahara, T. Katayama, M. Gunjima, Investigation on cutting mechanism in small diameter drilling for GFRP (thrust force and surface roughness at drilled hole wall), Composites Structures, (1997), Vol.38, 343-350.
- [4] H. Nobe, E. Aoyama, H. Inoue, T. Hirogaki, Y. Kitahara, T. Katayama, M. Gunjima, K. Ogawa and Y. Okuno, Study on cause of Internal Damage of Drilled GFRP (In Case of Small Diameter Drilling of Plain Woven Cloth), Key Engineering Materials, (1998), Vol. 137, 123-130.
- [5] Toshiki Hirogaki, Eiichi Aoyama, Hisahiro Inoue, Hiromichi Nobe, Keiji Ogawa, Youji Kitahara and Tsutao Katayama, PREDICTION OF DAMAGE WIDTH IN LASER DRILLING OF PRINTED WIRING BOARD USING FEM, Proceedings of ICCM-11, Gold Coast, Australia, (1997), Vol. IV, 343-351.
- [6] Eiichi AOYAMA, Hiromichi NOBE and Toshiki HIROGAKI, DRILLED HOLE DAMAGE OF SMALL DIAMETER DRILLING IN PRINTED WIRING BOARD, Proceedings of the International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, AMPT 9 and 16<sup>th</sup> Annual Conference of the Irish Manufacturing Committee, IMC16, Dublin, Ireland, (1999), Vol. 1, 531-538.
- [7] Toshiki HIROGAKI, Eiichi AOYAMA, Hiromichi NOBE, Kouichi YAMURA, Hisahiro INOUE and Tsutao KATAYAMA, Damage Development Diameter Drilling of GFRP for Printed Wiring Boards, Proceedings of the FRC2000, (2000), 612-618.
- [8] Eiichi AOYAMA, Toshiki HIROGAKI, Hisahiro INOUE, Misturu NISIZAWA, Kouichi YAMURA, Hiromichi NOBE, Tsutao KATAYAMA, Study on Small Diameter Drilling for Printed Wiring Board, Proceedings of the FRC2000, (2000), 230-237.
- [9] Eiichi AOYAMA, Hiromichi NOBE, Tadayuki IKUTA, Tsutao KATAYAMA, Toshiki HIROGAKI, Hisahiro INOUE, A NEW METHOD FOR DRILLING SMALLER THROUGH-HOLES IN PRINTED WIRING BOARDS USING A DIAMOND COATED DRILL, Proceedings of IPACK '01,

The Pacific Rim/ASME International Electronic Packaging, Technical Conference and Exhibition, (2001), Manufacturing, IPACK2001-15862.

[10]青山栄一, 廣垣俊樹, 井上久弘, 郡嶋宗久, 野辺弘道, 北原洋爾, 片山傳生, GFRPの小径穴あけ加工における加工穴面品質, 材料,(1996), Vol. 45, No. 5, 522-526.

[11]青山栄一, 廣垣俊樹, 井上久弘, 郡嶋宗久, 野辺弘道, 北原洋爾, 片山傳生, GFRPのレーザ穴あけ加工における穴品質の改善に関する研究, 材料,(1996), Vol. 45, No. 5, 577-581.

[12]青山栄一, 廣垣俊樹, 井上久弘, 郡嶋宗久, 野辺弘道, 北原洋爾, 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(加工穴壁面の表面粗さと切削抵抗の関係), 日本機械学会論文集(C編),(1997), 63巻608号, 1371-1377.

[13]廣垣俊樹, 青山栄一, 井上久弘, 片山傳生, プリント基板用GFRPのレーザ加工穴面の品質に関する研究(穴あけ加工時の被削材内部の温度部分布と損傷), 材料,(1997), Vol. 46, No. 11, 1329-1334.

[14]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),(1999), 65巻629号, 382-388.

[15]廣垣俊樹, 青山栄一, 井上久弘, 小川圭二, 野辺弘道, 片山傳生, レーザ加工による多層プリント基板のブラインドバイアホールの特性(アラミド繊維とガラス繊維強化基板の比較), 材料,(1999), Vol. 48, No. 5, 467-472.

[16]野辺弘道, 青山栄一, 廣垣俊樹, 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(工具の肩部の形状が内部損傷に及ぼす影響), 材料,(2001), Vol. 50, No. 10, 掲載予定.

[17]青山栄一, 廣垣俊樹, 井上久弘, 奥野泰和, 矢村剛一, 野辺弘道, 片山傳生, プリント基板の小径ドリル加工に関する研究(超硬ドリルとダイヤモンドコートドリルの比較), 日本機械学会論文集(C編),(2000), 66巻, 644号, 1355-1361.

[18]青山栄一, 廣垣俊樹, 井上久弘, 野辺弘道, 矢村剛一, 郡嶋宗久, 片山傳生, GFRPプリント基板の小径ドリル加工穴における損傷発生メカニズム, 第24回複合材料シンポジウム講演要旨集,(1999), 97-98.

[19]青山栄一, 新井典久, 廣垣俊樹, 土谷知己, 廣岡照久, 野辺弘道, 球状黒鉛鋳鉄の高速穴あけ時の加工精度に関する研究, 同志社大学理工学研究報告,(1995), VOL. 35, No. 34, JANUARY, 271-285.

[20]青山栄一, 廣垣俊樹, 井上久弘, 矢村剛一, 生田忠之, 野辺弘道, 片山傳生, プリント基板用GFRPの小径ドリル加工の損傷低減法, 第30回記念FRPシンポジウム講演論

文集,(2001), 351-354 .

[21]青山栄一, 廣垣俊樹, 矢村剛一, 野辺弘道, 生田忠之, 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(異なるガラス繊維束を用いた材料の内部損傷について), 日本機械学会 ,(2001), 投稿中 .

[22]井上久弘, 近藤諭, 安原拓人, 倉橋堯男, 刈谷憲一, 山口貴寛, ガラス布基材銅張積層板の穴あけ加工(穴内壁面性状に及ぼす繊維角の影響について), 繊維機械学会誌, (1994), Vol.47, No.5, 110-117 .

[23]津久井勤, 横須賀洋児, プリント配線基板のイオンマイグレーション発生パターンについての考察, プリント回路学会誌サーキットテクノロジー ,(1994), Vol. 9, No. 3, 190-198 .

[24]G. T. Kohman et al., Silver Migration in Electrical Insuration, Bell System Tech., (1995), Vol. 34, 299.

[25]D. J. Lando et al., Conductive Anodic Filaments in Reinforced Polymeric Dielectrics Formation and Prevention, 17th IEEE Ann. Proc. Rel. Phys., (1979), 51.

[26]T. Kawanobe, K. Otsuka, Metal Migration in Electronic Components, 32nd IEEE Electron Components Conf., (1982), 220-228.

[27]高萩泰 他, 絶縁基板上の銅移行について(第5報), 茨城県工技センター研究報告書 ,(1987), No. 15, 36-37 .

[28]津久井勤 他, プリント回路板イオンマイグレーションと誘導特性, 信学技報, (1990), Vol. 90, No. 9, ECM90-5, 22-35 .

[29]高田幸弘, 賀籐誠司, 岡本朋己, 島本敏次, 伊藤順一, 有限要素法を用いた銅ペーストスルーホール目詰配線板の熱応力解析, プリント回路学会誌サーキットテクノロジー, (1994), Vol. 9, No. 3, 199-205 .

[30]辻岡則夫, 木村康之, 佐藤実, ガラスクロス, プリント回路学会誌サーキットテクノロジー ,(1993), Vol. 8, No. 2, 172-181 .

[31]辻岡則夫, 木村康之, 加工性改良プリント配線板, プリント回路学会第2回学術講演大会論文集 ,(1987), 55 .

[32]W. H. Willott, IX-The Hardness of Glass, Journal of the Society of Glass Technology, (1950), Vol. 34, 77.

[33]荒井邦夫, 穴あけ加工と加工機械, プリント回路学会誌サーキットテクノロジー, (1993), Vol. 8, No. 2, 182-192 .

- [34]高見沢裕,配線板密度の将来,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1993), Vol. 8, No. 1, 1-5.
- [35]豊永実,ダイレクト プレーティング,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1993), Vol. 8, No. 1, 47-57.
- [36]国武憂璽,積層板用樹脂,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1993), Vol. 8, No. 1, 60-73.
- [37]高野希,柴田勝司,小林和仁,村井曜,耐電食性高耐熱FR-4多層材,日立化成テクニカルレポート,(1990), 7, No. 15, 29-32.
- [38]淡野富男,石川武,吉光時夫,高木清,ガラス基材銅張積層板の絶縁信頼性,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1998), Vol. 3, No. 4, 212-219.
- [39]津坂英夫,宮本克己,横内弘宇,菊池千之,多層プリント基板の穴明け加工におけるスミアの発生,プリント回路学会第4回学術講演大会講演論文集,(1989), 75
- [40]津坂英夫,プリント配線板製造における機械加工と切削工具,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1993), Vol. 8, No. 1, 74-84.
- [41]H. Tsizaka, Resin-smear on Drilling of Multilayer Printed Wiring Board, P. C. World Convention 5, (1990), C3/1.
- [42]北村洋一,高浜隆,星之内進,熱応力にもとづいたスルーホールの熱サイクル寿命予測,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1991), Vol. 6, No. 6, 307-314.
- [43]藤井博,ハイスロー硫酸銅めっきのスルーホール内つきまわり性,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1991), Vol. 6, No. 4, 215-219.
- [44]水元省三,縄船秀美,小島環生,芳賀正記,新居啓二,小径穴および多層プリント配線板の製造を目的とした新しい電気銅めっき,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1990), Vol. 5, No. 2, 67-72.
- [45]西浦慎一,池滝慶治,プリント配線板のレーザ穴加工,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1990), Vol. 5, No. 2, 82-89.
- [46]山口幸正,ガラス布基材エポキシ樹脂銅張積層板のリフローはんだ耐熱性評価技術の検討,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1989), Vol. 4, No. 5, 241-244.
- [47]高木清,濱口達夫,青木正光,中村繁好,橋本三男,金谷保彦,荒井邦夫,岡安均,松村雅之,青木潤,岡村寿郎,岩岡保彦,3. 高多層プリント配線版の製造技術,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1989), Vol. 4, No. 3, 129-150.

- [48]竹尾晴久,密着センサを応用した小径ホールの検査方法,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1988),Vol. 3, No. 6, 354-358.
- [49]安藤護俊,稲垣雄史,多層プリント配線板スルーホール検査技術,プリント回路学会誌サーキットテクノロジー,(1987),Vol. 2, No. 4, 224-231.
- [50]高橋亨,青山俊身,サンドブラスト法によるビルトアップ基板のIVH形成,エレクトロニクス学会誌,(1998),Vol. 1, No. 2, 119-123.
- [51]荒井邦夫,レーザ穴あけ技術,回路実装学会誌,(1998),Vol. 13, No. 2, 79-84.
- [52]鶴田加一,吉原左知雄,白樫高史,プリント回路板のマイグレーション防止方法の検討,回路実装学会誌,(1997),Vol. 12, No. 6, 425-428.
- [53]荒井邦夫,中村敏夫,鹿島豊,装置と自動化技術委員会(機械加工・積層専門委員会報告),回路実装学会誌,(1998),Vol. 11, No. 4, 248-250.
- [54]大鳥利行,プリント回路板の絶縁劣化要因としてのイオンマイグレーション(その発生メカニズムと抑制策),回路実装学会誌,(1995),Vol. 10, No. 2, 80-86.
- [55]高木清,多層PWBと製造技術,表面実装技術,(1996),7, 58-60.
- [56]穴あけ用ドリル,表面実装技術,(1994),6, 94-95.
- [57]大久保勇三,松本勇仁,穴あけ,分割加工のポイントとトラブル対策,表面実装技術,(1994),11, 9-15.
- [58]海藤耕二,加工トラブル“ピンクリング”対策用穴あけドリル,表面実装技術,(1994),11, 22-26.
- [59]津坂英夫,PWBの穴あけにおける加工条件の最適化,表面実装技術,(1994),11, 27-30.
- [60]雀部俊樹,プリント配線板のめっき技術,表面実装技術,(1994),11, 62-64.
- [61]荒井邦夫,薄板多層PWB穴あけ技術の動向,表面実装技術,(1993),4, 22-26.
- [62]村上敢次,赤沢諭,薄板への最適めっき技術,表面実装技術,(1993),4, 27-30.
- [63]津坂英夫,最近の穴あけ加工の技術動向,表面実装技術,(1993),4, 77-80.
- [64]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,(1994),Vol. 60, No. 12, 1796-1800.
- [65]高永明,鳴瀧則彦,積層材穴加工の最適工具形状と加工方法,広島大学工学部研究

報告 ,(1991) , 40 , 1 , 17-23 .

[66]井上久弘 , 山口淳 , 餅田恭志 , 西野剛夫 , 一方向 FRP 材を切削加工した場合の工具摩耗への母材特性の変化の影響 , 材料 ,(1994) , Vol. 43 , No. 487 , 451-456 .

[67]井上久弘 , 山口淳 , 餅田恭志 , FRP 材の切削加工に関する研究( 切削抵抗について) , 第 23 回 FRP シンポジウム講演論文集 ,(1994) , 151-155 .

[68]平中誠 , 横内弘宇 , 李錫峰 , 海藤耕治 , 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 ,(1993) , 59 , 1 , 119-124 .

[69]金枝敏明 , CFRP ( 炭素繊維強化プラスチック ) の切削機構に関する研究 ( 第 3 報 ) 工具刃先丸みならびに逃げ角の影響 , 精密工学会誌 ,(1991) , 57 , 3 , 491-496 .

[70]井上久弘 , 井戸守 , ガラス繊維強化プラスチックの押込み変形機構に関する研究 第 報半角くさびによるガラス繊維の剥離及び破壊について , 日本複合材料学会誌 , (1978) , 4 , 3 , 112-118 .

[71]中島利勝 , 大橋一仁 , 塚本真也 , 古川竜治 , ガラス繊維強化プラスチックの研削過程に関する研究 , 精密工学会誌 ,(1991) , 57 , 7 , 1253-1258 .

[72]王晓渡 , 中山一雄 , 新井実 , 繊維強化複合材料の切削加工に関する研究 ( 第 2 報 ) FRP の切削仕上面創生機構 , 精密工学会誌 ,(1991) , 57 , 8 , 1437-1442 .

[73]朝比奈奎一 , 鈴木節夫 , エンドミルによるトリミング加工における GFRP の切削特性 , 精密工学会誌 ,(1991) , 57 , 12 , 2187-2192 .

[74]金枝敏明 , 高橋正行 , CFRP ( 炭素繊維強化プラスチック ) の切削機構に関する研究 ( 第 2 報 ) 切削残留量ならびに加工変質深さの解析 , 精密工学会誌 ,(1990) , 56 , 6 , 1058-1063 .

[75]王晓渡 , 中山一雄 , 新井実 , 繊維強化複合材料の切削加工に関する研究 ( 第 2 報 ) GFRP の仕上げ面品位について , 精密工学会誌 ,(1989) , 55 , 4 , 709-714 .

[76]金枝敏明 , 高橋正行 , CFRP ( 炭素繊維強化プラスチック ) の切削機構に関する研究 ( 第 1 報 ) 極低速切削速度下における加工面生成機構 , 精密工学会誌 ,(1989) , 55 , 8 , 1456-1461 .

[77]長谷川嘉雄 , 花崎伸作 , 橋村雅之 , GFRP の加熱切削 , 精密工学会誌 ,(1988) , 54 , 3 , 594-599 .

[78]竹山秀彦 , 飯島昇 , 野口祐成 , 加賀美由次 , ガラス繊維複合材料 ( GFRP ) の切削機構に関する研究 , 精密工学会誌 ,(1987) , 53 , 9 , 1447-1452 .

[79]百武秀, 山本俊浩, 円弧をもつFRP板の引張りによる破壊の条件, 材料,(1994), Vol.43, No.489, 679-683.

[80]日下貴之, 黒川知明, 山内良昭, CFRPのモード 層間破壊じん性のひずみ速度依存性, 材料,(1994), Vol.43, No.487, 445-450.

[81]小林佑規, 田中義久, 衝撃引張におけるFRP積層板の機械的特性, 材料,(1994), Vol.43, No.486, 290-296.

[82]花崎伸作, 藤原順介, 野村昌孝, CFRP切削における工具摩耗機構, 日本機械学会論文集(C編),(1994), 60巻, 569号, 297-302.

[83]大久保修, 稲崎一郎, 青山藤詩郎, 清水哲, 微小径ドリルの破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),(昭60), 51巻, 471号, 2929-2935.

[84]佐久間敬三, 瀬戸雅文, 谷口正紀, 横尾嘉道, 炭素繊維強化プラスチックの切削における工具摩耗(工具材種の影響), 日本機械学会論文集(C編),(昭60), 51巻, 463号, 656-663.

[85]佐久間敬三, 横尾嘉道, 瀬戸雅文, 強化プラスチック(GFRP・CFRP)の穴あけに関する研究(工具材種と摩耗挙動), 日本機械学会論文集(C編),(昭58), 49巻, 466号, 1799-1806.

[86]佐久間敬三, 瀬戸雅文, 強化プラスチック(GFRP)切削における工具摩耗(繊維の配列方向と工具摩耗との関係), 日本機械学会論文集(C編),(昭57), 48巻, 436号, 656-663.

[87]佐久間敬三, 瀬戸雅文, 強化プラスチック(GFRP)切削における工具摩耗(切削温度と工具摩耗との関係), 日本機械学会論文集(C編),(昭55), 46巻, 408号, 990-997.

[88]窪田英毅, 田部井英世, 佐藤崇, 山口雅之, 送りに振動を重畳させた小径穴加工の研究, 精密工学会誌,(1995), 61, 7, 1006-1010.

[89]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),(昭36), 27巻, 178号, 816-825.

[90]S. J. Lee, K. F. Eman, S. M. Wu, An Analysis of the Drill Wandering Motion, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, (1987), Vol. 109, 297-305.

[91]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),(昭59), 50巻, 453号, 898-906.

- [92]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(主として主切刃部逃げ面)の影響〕,日本機械学会論文集(C編),(昭59),50巻,453号,907-914.
- [93]D. F. GALLOWAY, Some Experiments on the Influence of Various Factors on Drill Performance, TRANSACTIONS OF THE ASME, FEBRUARY, (1957).
- [94]S.Ema, H. Fujii, E. Marui, Whirling Vibration in Drilling. Part 3: Vibration Analysis in Drilling Workpiece with a Pilot Hole, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, (1988), Vol. 110, 315-321.
- [95]佐久間敬三,清田宏,森田秀則,ドリル加工における穴の位置精度に関する研究(食い付き時の拳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)(昭57),48巻,432号,1275-1282.
- [96]S.FUJII, M. F. DeVRIES, S. M. Wu, An Analysis, of Drill Geometry for Optimum Drill Design by Computer. Part I-Drill Geometry Analysis, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, (1970), 647-656.
- [97]S.FUJII, M. F. DeVRIES, S. M. Wu, An Analysis, of Drill Geometry for Optimum Drill Design by Computer. Part II-Computer Aided Design, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, (1970), 657-666.
- [98]窪田英毅,田部井英世,澤入芳洋,裏バリ取りを可能としたドリルの開発,精密工学会誌,(1992),58,4,655-660.
- [99]高津戸光雄,高田昇,貴志浩三,AEを用いたドリル寿命判定に関する研究,日本機械学会論文集(C編),(1991),57巻,542号,3352-3357.
- [100]江馬諭,丸井悦男,超硬3枚刃の切削性能,日本機械学会論文集(C編),(1991),57巻,533号,320-325.
- [101]三宅輝明,山本章裕,北嶋弘一,田中行雄,高沢孝哉,ドリル加工におけるバリ生成に関する研究(バリ生成時の材料の変形状態),精密工学会誌,(1991),57,3,485-490.
- [102]加藤正倫,榎本眞三,斎藤義夫,花岡忠昭,切削時開始時のドリル先端部の拳動,精密工学会誌,(1990),56,8,108-113.
- [103]帯川利之,白樫高洋,臼井英治,FRP切削の有限要素シュミレーション,精密工学会誌,(1991),57,6,1029-1034.
- [104]白樫高洋,帯川利之,笹原弘之,和田武司,切削加工変質層生成過程のシュミレーション解析(第1報)残留応力部分分布の予測法の提案と妥当性の検証,精密工学会誌,

(1993), 59, 10, 1695-1700.

[105]前川克廣,前田正史,三次元連続型切りくず生成過程のシュミレーション解析(第1報),有限要素法定式化と一二の結果,精密工学会誌,(1991),59,11,1827-1832.

[106]臼井英治,白樫高洋,北川武揚,三次元切削温度部分分布の数値解析,精密精密機械,(1975),41巻,12号,1141-1146.

[107]森脇俊道,杉村延広,樂昇,剛塑性有限要素法による超微小切削機構の解析,精密工学会誌,(1991),57,12,2163-2168.

[108]三宅輝明,山本章裕,北嶋弘一,田中行雄,高沢孝哉,ドリル加工におけるバリ生成に関する研究(バリ生成時の材料の変形状態),精密工学会誌,(1991),57,3,485-490.

[109]帯川利之,安味貞正,白樫高洋,臼井英治,高分子材料の切削過程の有限要素法解析(第1報)硬質塩化ビニル樹脂切削のシュミレーション,精密工学会誌,(1987),53,2,288-294.

[110]和田明浩,元木信弥,福田武人,FRP積層板のき裂損傷発達過程の損傷力学的定式化(第2報,積層板構成式の定式化),日本機械学会論文集(A編),(1998),64巻,622号,1501-1508.

[111]和田明浩,元木信弥,福田武人,FRP積層板のき裂損傷発達過程の損傷力学的定式化(第1報,き裂発生層の構成式の定式化),日本機械学会論文集(A編),(1998),64巻,622号,1493-1500.

[112]荒井正大,立石康博,足立忠晴,松本浩之,有限要素法によるCFRP積層はりの損傷進展解析,日本機械学会論文集(A編),(1998),64巻,627号,2686-2693.

[113]元木信弥,安田哲,福田武人,FRP直交積層板におけるマトリックスキ裂損傷の発達(第3報,き裂損傷の発達則の定式化),日本機械学会論文集(A編),(1997),63巻,615号,2332-2337.

[114]島村佳伸,轟章,小林英男,中村春夫,FRP損傷シュミレーションへの破壊モードの影響,日本機械学会論文集(A編),(1996),62巻,594号,382-334.

[115]白秋実,村上澄男,金川靖,田中行平,マトリックスキ裂と層間はく離を考慮したFRP積層板の損傷モデル,材料,(1997),Vol.46, No.8,981-988.

[116]荻原慎二,武田展雄,小林訓史,小林昭,複合材料積層板におけるトランスバースクラックの損傷力学解析,材料,(1998),Vol.47, No.1,68-72.

[117]座古勝,辻上哲也,積層複合材料の層間はく離シミュレーションプログラムの開発,材料,(1994),Vol.43, No.489,684-689.

- [118]座古勝,辻上哲也,高野直樹,津村卓也,損傷力学に基づく複合材料用3次元有限要素法の開発,材料,(1995),Vol.44, No.502, 921-926.
- [119]座古勝,辻上哲也,北村貴典,積層複合材料構造物3次元応力解析手法の一提案,材料,(1995),Vol.44, No.499, 390-394.
- [120]川田宏之,杉野正明,福山義之,林郁彦,一方向GFRPの内面モード破壊じん性評価(FEMによる破壊シミュレーション),材料,(1995),Vol.44, No.499, 470-476.
- [121]島村佳伸,轟章,小林英男,中村春夫,箕輪智夫,FRP積層板の損傷シミュレーション手法の評価,日本機械学会論文集(A編),(1994),60巻,579号,2498-2503.
- [122]座古勝,辻上哲也,津村卓也,損傷異方性を考慮した複合材料用有限要素法の開発,材料,(1994),Vol.43, No.486, 265-270.
- [123]S. J. Lewis, The use of carbon fibre composites on military aircraft, Composites Manufacturing, (1994), Vol. 5, No. 2, 95-103
- [124]R. F. J. McCarthy, G. H. Haines and R. A. Newley, Polymer composite applications to aerospace equipment, Composites Manufacturing, (1994), Vol. 5, No. 2, 83-93.
- [125]S. R. Frost and A. Cervenka, Glass fiber-reinforced epoxy matrix filament-wound pipes for use in the oil industry, Composites Manufacturing, (1994), Vol. 5, No. 2, 73-81.
- [126]M. K. Chryssanthopoulos, V. Giavotto and C. Poggi, Characterization of manufacturing effects for buckling-sensitive composite cylinders, Composites Manufacturing, (1995), Vol. 6, No. 2, 93-101.
- [127]Erik Persson, Ingvar Eriksson and Leif Zackrisson, Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates, Composites, Part A, (1997), 28A, 141-151.
- [128]JIAYU XIAO and CLAUDE BATHIAS, Fatigue Damage and Fracture Mechanism of Notched Woven Laminates, Journal of COMPOSITE MATERIALS, (1994), Vol. 28, No. 12, 1127-1139.
- [129]SCOT D. ANDREWS, OZDEN O. OCHOA and STEVE D. OWENS, The Effects of Fastener Hole Defects, Journal of COMPOSITE MATERIALS, (1993), Vol. 27, No. 1, 2-20.
- [130]DORON SHALEV and K. L. REIFSNIDER, Study of the Onset of Delamination at Holes in Composite Laminates, Journal of COMPOSITE MATERIALS, (1990), Vol. 24, 42-71.

[131]C. SOUTIS, N. A. FLECK and P. A. SMITH, Failure Prediction Technique for Compression Loaded Carbon Fibre-Epoxy Laminate with Open Holes, Journal of COMPOSITE MATERIALS, (1991), Vol. 25, 1476-1498.

[132]Meng Hou and K. Friedrich, Resistance welding of continuous glass fibre-reinforced polypropylene composites, Composites Manufacturing, (1992), Vol. 3, No. 3, 153-163.

[133]I. Crivelli Visconti, A. Paesano and M. Penasa, An investigation of antiwear coatings on fibre-reinforced plastics, Composites Manufacturing, (1992), Vol. 3, No. 1, 7-13.

[134]P. T. Curtis and D. L. Whitehead, The effect of fabrication-induced surface roughness in the compressive and flexural properties of carbon fibre-reinforced plastics, Composites Manufacturing, (1990), Vol. 1, No. 4, 235-241.

[135]Albert S. Tam and Timothy G. Gutowski, The Kinematics for forming ideal aligned fibre composites into complex shapes, Composites Manufacturing, (1990), Vol. 1, No. 4, 219-228.

[136]MENG-KAO THE AND CHUNG-MING TAN, Buckling of Elliptically Delaminated Composite Plates, Journal of COMPOSITE MATERIALS, (1994), Vol. 28, No. 1, 36-52.

[137]G. CAPRINO and V. TAGLIAFERRI, DAMAGE DEVELOPMENT IN DRILLING GLASS FIBER REINFORCED PLASTICS, Int. J. Mach. Tools Manufact., (1995), Vol.35, No. 6, 817-829.

[138]R. STONE and K. KRISHNAMURTHY, ANEURAL NETWORK THRUST FORCE CONTROLLER TO MINIMIZE DELAMINATION DURING DRILLING OF GRAPHITE-EPOXY LAMINATES, Int. J. Mach. Tools Manufact., (1996), Vol.36, No. 9, 985-1003.

[139]Alan Chambers and Gordon Bishop, THE DRILLING OF CARBON FIBER POLYMER MATRIX COMPOSITES, Proceedings of ICCM-10, (1995), Vol. III: Processing and Manufacturing, 565-571.

[140]G.CAPRINO, V. TAGLIAFERRI and L. COVELL, CUTTING GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITES USING CO<sub>2</sub> LASER WITH MULTIMODAL-GAUSSIAN DISTRIBUTION, Int. J. Mach. Tools Manufact., (1995), Vol.35, No. 6, 831-840.

[141]Shin-Chieh Lin and Jun-Ming Shen, Drilling Unidirectional Glass Fiber-Reinforced Composite Materials at High Speed, Journal of COMPOSITE MATERIALS, (1999), Vol. 33, No. 9, 827-851

- [142]C.W. Wern, M.Ramulu, K. Colligan, A Study of the surface texture of composite drilled holes, *Journal of Materials Processing Technology*, (1993), 37, 373-389
- [143]S.K. MALHOTRA, SOME STUDIES ON DRILLING OF FIBROUS COMPOSITES, *Journal of Materials Processing Technology*, (1990), 24, 291-300.
- [144]G. R. Bishop, N. N. Z. Gindy, An investigation into the drilling of ballistic Kevlar composites, *Composites Manufacturing*, (1990), Vol. 3, No. 3, 155-159.
- [145]S. Abrate and D. A. Walton, Machining of composite materials. Part I: Traditional methods, *Composites Manufacturing*, (1992), Vol. 3, No. 2, 75-83.
- [146]T. Radhakrishnan and S. M. Wu, On-Line Hole Quality Evaluation for Drilling Composite Material Using Dynamic Data, *Journal of Engineering for Industry*, (1981), Vol. 103, 119-125.
- [147]Joseph A.Miller, Drilling graphite/epoxy at Lockheed, *AMERICAN MACHINIST & Automated Manufacturing*, (1987), 10, 70-71.
- [148]S. Jain, D. H. C. Yang, Effects of Feedrate and Chisel Edge on Delamination in Composites Drilling, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, (1993), Vol. 115, 398-405.
- [149]V. Chandrasekharan, S. G. Kapoor, R. E. Devor, A Mechanistic Approach to Predicting the Cutting Forces in Drilling: With Application to Fiber-Reinforced Composite Materials, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, (1995), Vol. 117, 559-570.
- [150]M. N. Srinivasan, C. L. Hough, R. W. Bolton, F. M. Davis, Evaluation of Drilled Hole Quality in Printed Circuit Boards, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, (1995), Vol. 117, 248-252.
- [151]G. DiPaoro, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, An Experimental Investigation of the Crack Growth Phenomenon for Drilling of Fiber-Reinforced Composite Materials, *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry*, (1996), Vol. 118, 104-110.
- [152]S. Abrate and D. Walton, Machining of composite materials. Part II: Non-traditional methods, *Composites Manufacturing*, (1992), No. 2, 85-94.
- [153]M. Dell'orba, L. M. Galantucci and S. Miglietta, An Experimental study on

laser drilling and cutting, of composite materials for the aerospace industry using excimer and CO<sub>2</sub> sources, Composites Manufacturing, Vol. 3, No. 1, 14-19.

[154]Janet K. Lump and Sudhakar Raman, Electrical Characterization of Laser Machined and Metallized Vias in AlN with Thick Film Interconnect, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, PART C, Vol. 21, No. 2, (1998), 118-125.

[155]Kazunari Nawa and Masakazu Ohkita, Reliability of the Laminate from Advanced COPNA-Resin/E-Glass Fabric System, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, PACKAGING, AND MANUFACTURING TECHNOLOGY, PART B, Vol. 20, No. 1, (1997), 75-86.

[156]Ho-Cheng, H. & Dharan, C.K.H., Delamination during drilling in composite laminates, Trans. ASME, J. Eng. for Industry, (1990), 112, 236-239.

[157]M.Ramulu, C.W. Wern and J.I. Garbini, Effect of fiber direction on surface roughness measurements of machined graphite/epoxy composite, Composites Manufacturing, (1993), Vol.4, No.1, 39-51.

[158]Dipaolo G., Kapoor S. G. and Devor R.E., An experimental investigation of the crack growth phenomenon for drilling of fiber-reinforced composite materials, Trans. ASME, J. Eng. for Industry, (1996), 118, 104-110.

[159]Andrews S. D. and Ocha O. O., The effects of faster hole defects, J. Comp. Mat., (1993), 27, 2-20.

[160]Caprio G. and Tagliaferri V., Damage development in drilling glass fiber reinforced plastics, Int. J. Mach. Tools Manuf., (1995), 35, 817-829.

[161]J.A. スカーレット編, 島田良巳訳, 多層プリント回路ハンドブック, 近代科学社, (1992), 268.

[162]A. Cambers, G. Bishop, Proc. of ICCM-10, (1995), 565

[163]小林昭, プラスチックの機械加工, 日刊工業新聞社, (1966), 43-49.

[164]新素材ハンドブック編集委員会編, 新素材ハンドブック, 丸善, (1988), 102-105.

[165]宮入裕夫, 複合材料の辞典, 朝倉書店, (1991), 148.

[166]新保正樹, エポキシ樹脂ハンドブック, 日刊工業新聞社, (昭 62 年), 96.

[167]垣内弘, エポキシ樹脂, 昭光堂, (1990), 94.

[168]プリント回路技術用語辞典編集委員会編, プリント回路技術用語辞典, 日刊工業

新聞社 ,(1999) .

[169]吉光時夫 ,初級プリント回路技術者実力向上講座2 プリント配線材料 ,日刊工業新聞社 ,(1994) .

[170]PWB機械加工研究会編 ,初級プリント回路技術者実力向上講座3 プリント配線板の穴あけ・外形加工 ,日刊工業新聞社 ,(1994) .

[171]伊東謹司 ,プリント配線技術読本 第2版 ,日刊工業新聞社 ,(1989) .

[172]高木清 ,多層プリント配線板製造技術 ,日刊工業新聞社 ,(1993) .

[173]伊藤謹司 ,プリント配線板技能検定対策 プリント配線板製造入門 ,日刊工業新聞社 ,(1995) .

[174]新マシニング・ツール辞典編集委員会 ,新マシニング・ツール辞典 ,産業調査会事典出版センター ,(1991) .

[175]津久井勤 ,プリント配線基板で発生するイオンマイグレーションと信頼性解析 ,表面技術 ,(2000) , Vol.51 , No.5 , 473-478 .

[176]柳澤武 ,イオンマイグレーションの歴史と発生要因 ,表面技術 ,(2000) , Vol.51 , No.5 , 479-483 .

[177]藤城敏史 ,マイグレーション成長メカニズムと寿命予測 ,表面技術 ,(2000) , Vol.51 , No.5 , 484-489 .

[178]首藤克彦 ,家電機器の事故事例とマイグレーション ,表面技術 ,(2000) , Vol.51 , No.5 , 490-494 .

[179]野々垣光裕 ,イオンマイグレーションの評価事例 ,表面技術 ,(2000) , Vol.51 , No.5 , 495-499 .

[180]藤城敏史 ,谷野克巳 ,竜山智栄 ,イオンマイグレーションによるガラス基板上の銀デンドライトの成長とフラクタル次元 ,電気学会論文誌 A 基礎・材料・共通部門紙 ,(1998) , Vol.118 , No.7/8 , 838-845 .

[181]阿部康男 ,町田正弘 ,五反田修 ,原正明 ,江上明 ,得平雅也 ,極小径ドリルによるプリント基板の加工 ,R&D 神戸製鋼技報 ,(1991) , Vol.41 , No.3 , 38-41 .

[182]宮崎健一 ,電子部品の信頼性技術に関する研究(プリント配線板のマイグレーション評価) ,千葉機械金属試験所平成8年度研究報告 ,(1997) , No.26 , 8 , 49-51 .

[183]福田昭 ,プリント基板のマイグレーション ,絶縁層の低効率などで発生のしやすさに違い ,日経エレクトロニクス ,(1990) , No.502 , 6.11 , 279-281 .

[184]野辺弘道 ,青山栄一 ,廣垣俊樹 ,生田忠之 ,片山傳生 ,プリント基板用 GFRP の小径ドリル加工における画像処理システムを利用した内部損傷の評価法の提案 ,同志社大学理工学研究報告 ,(2001) , VOL.12 , No.2 , 81-89 .

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり，同志社大学工学部教授 片山傳生 博士より御懇切なる御指導ならびに御鞭撻を賜り，また終始温かい激励を賜りました．衷心より厚く感謝の意を表します．

アカマツフォース株式会社代表取締役社長 赤松基次 氏，同社専務取締役 赤松雅己 博士には，本研究を遂行するにあたり多大な便宜をお図り頂きました．ここに謹んで感謝の意を表します．

同志社大学工学部教授 青山栄一 博士には，本論文の遂行に対しまして終始多大な御指導ならびに御鞭撻を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

同志社大学工学部教授 藤井透 博士には，本論文を纏めるにあたり数々の有益な御助言を賜りました．心から感謝の意を表します．

滋賀県立大学工学部専任講師 廣垣俊樹 博士には，本論文を纏めるにあたり終始温かい激励と有益な御助言を賜りました．心から御礼申し上げます．

愛知工科大学工学部教授 井上久弘 博士には，研究の遂行に数々の有益なご教示を賜りました．心より感謝申し上げます．

同志社大学工学部教授 今井田豊 博士には，本論文を纏めるにあたり多大な御指導を賜りました．ここに謹んで感謝の意を表します．

同志社大学工学部教授 松岡敬 博士には，本論文を遂行するにあたり多大な御鞭撻を賜りました．心から厚く御礼申し上げます．

本研究の実験材料の提供をして頂きました日東紡績株式会社ならびに実験工具の提供をして頂きましたMMC コベルコツール株式会社の関係各位に厚く御礼申し上げます．

舞鶴工業高等専門学校助教授 篠原正浩 博士には，本論文を纏めるにあたり温かい激励を賜りました．心より感謝申し上げます．

本研究を行うにあたり，多方面にわたり御協力，御助言を賜りました同志社大学大学院修了者の上西康弘氏，廣岡照久氏，市田典氏，森敬祐 博士，郡嶋宗久氏，小川圭二氏，奥野泰和氏，矢村剛一氏をはじめ卒業生諸氏に深く感謝いたします．

本研究を行うにあたり，御助力を賜りました同志社大学大学院生 生田忠之 氏ならびに同志社大学片山・青山研究室の多くの方々に深く感謝の意を表します．

本研究を進めるにあたり，自由な環境を与えて下さり，日々支援して頂きました両親に心から感謝いたします．

本研究は，以上の方々の他にも数多くの方々の御指導，御協力のもとに完成されたものであり，ここに謹んで御礼申し上げます．