

同志社大学 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

大学院工学研究科機械工学専攻

博士課程(後期課程)

野辺弘道

2001年7月28日

# 第1章 緒論 研究の背景及び目的(1)

携帯情報端末(ノートパソコン, 携帯電話, デジタルカメラ)

小型化・高性能化

内装  
主要部品

急激に普及



H190 × W55 × L220(mm)  
重量3000(g)



H175 × W42 × L92(mm)  
重量900(g)



H123 × W39 × L14(mm)  
重量57(g)

プリント基板

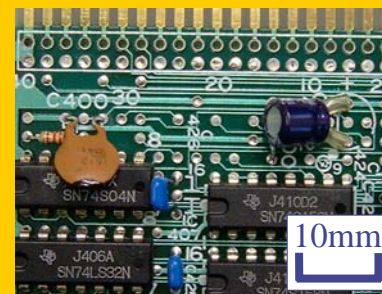
スルーホール小径化

実装密度向上

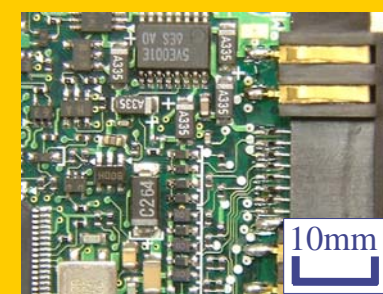
2次加工

電氣的接続信頼性

精密な加工が要求

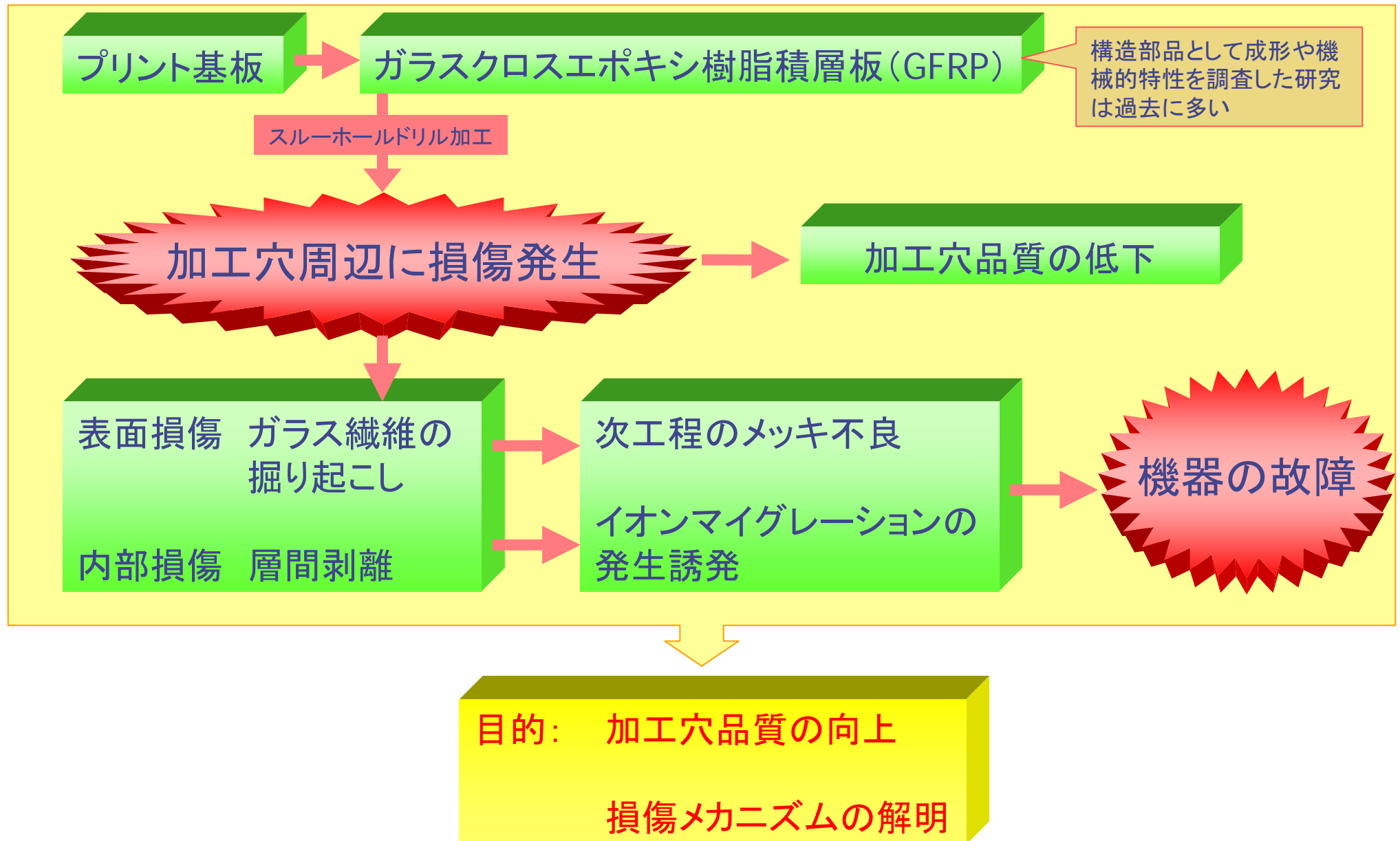


一昔前のノート型パソコンの  
プリント基板

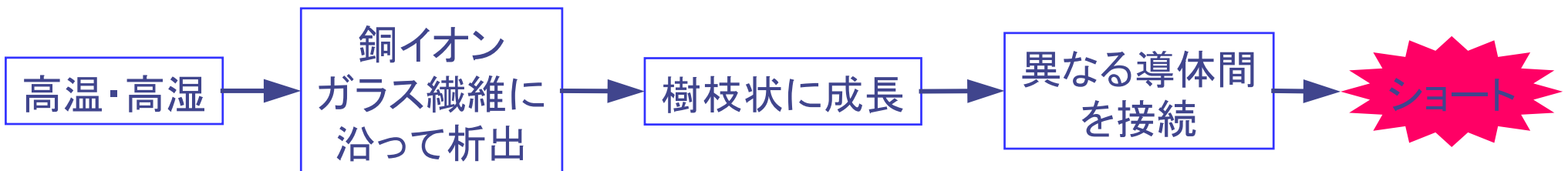
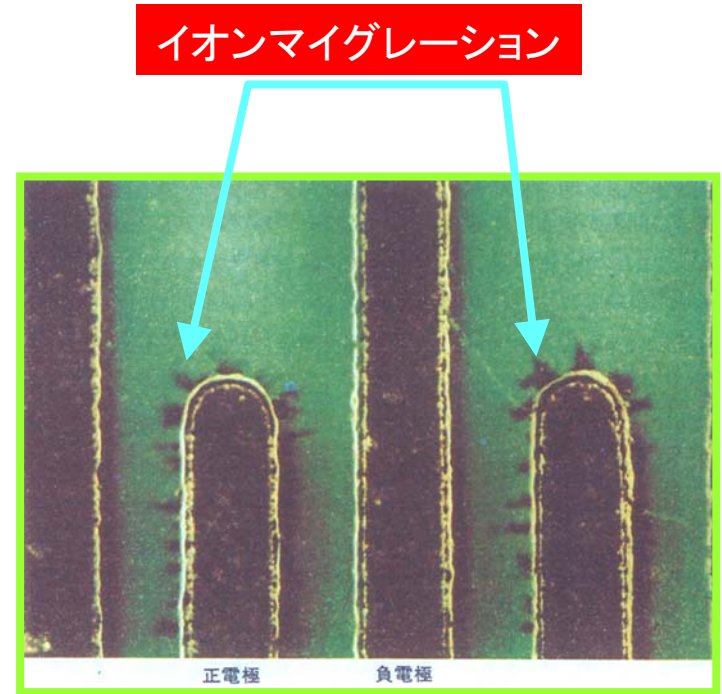
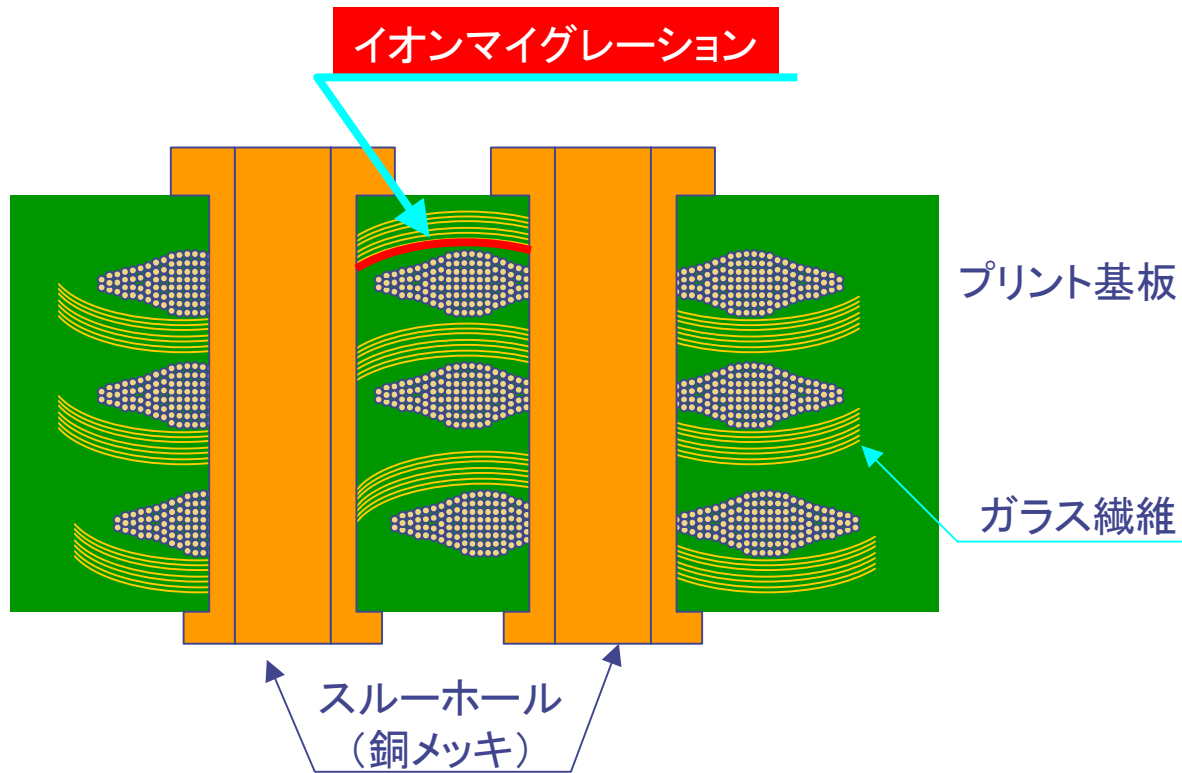


最近の携帯電話の  
プリント基板

## 研究の背景及び目的(2)



# Ionic migration



# 章構成

第1章

緒論

第2章

画像処理による内部損傷の  
評価方法の提案

内部損傷を定量的に測定可能な評価方法を提案・構築

第3章

表面損傷と切削抵抗の特徴

切削条件及び切削抵抗が表面粗さに及ぼす影響を調査

第4章

内部損傷の発生形態と  
加工穴品質の信頼性

切削条件が内部損傷及びばらつきに及ぼす影響を調査

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

内部損傷の発生形態がばらつく原因を検討

第6章

切れ刃形状と損傷メカニズム

工具形状が内部損傷に及ぼす影響を調査

第7章

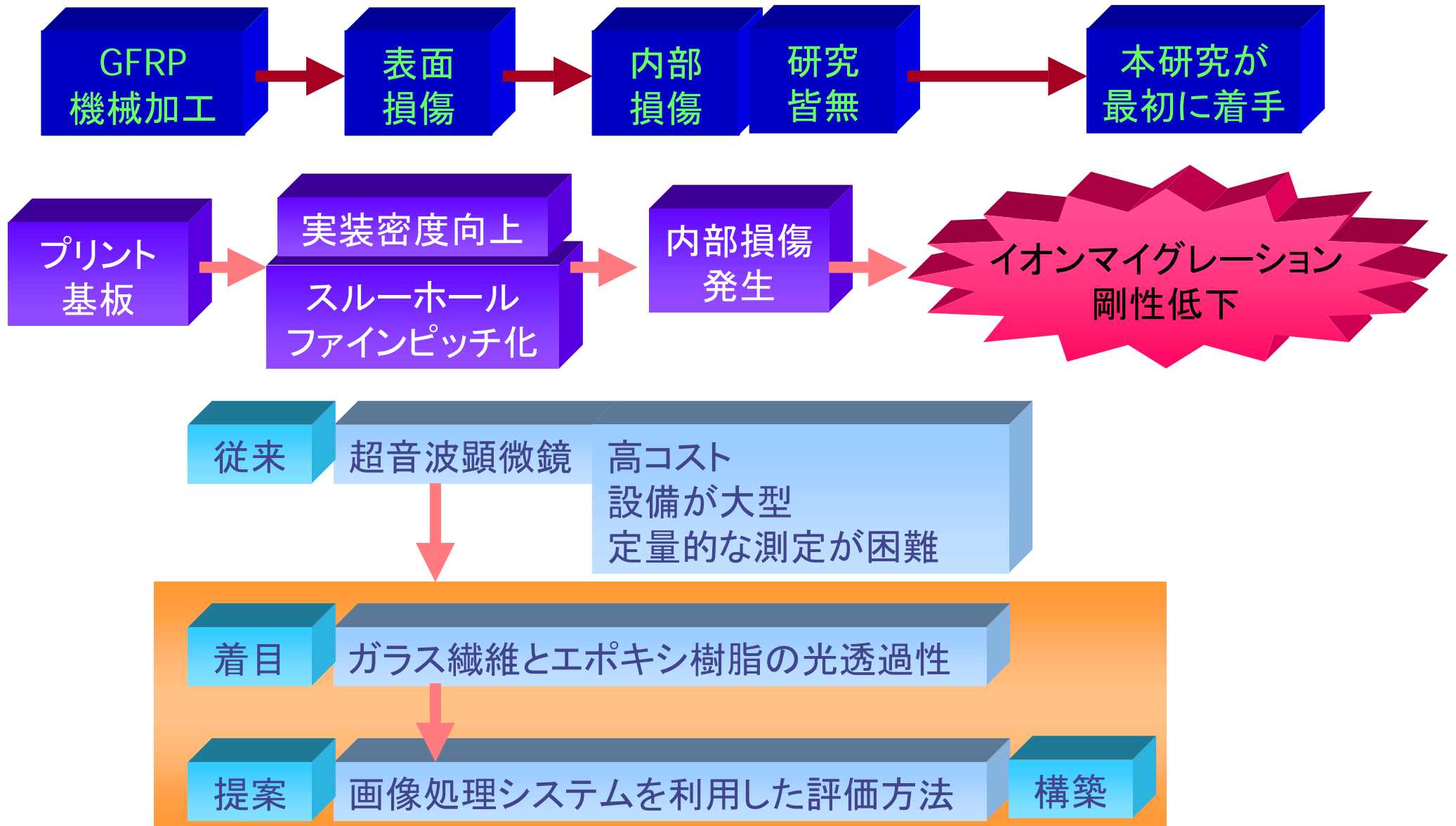
工具摩耗と加工穴品質の変化

加工回数と工具摩耗及び内部損傷との関係を調査

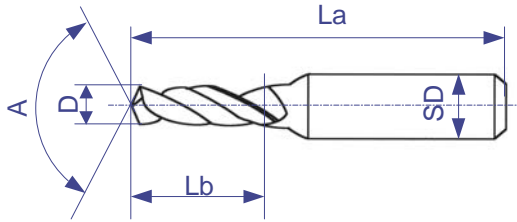
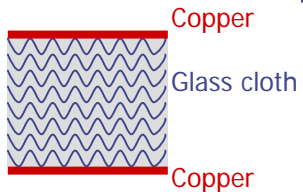
第8章

結論

## 第2章 画像処理による内部損傷の評価方法の提案

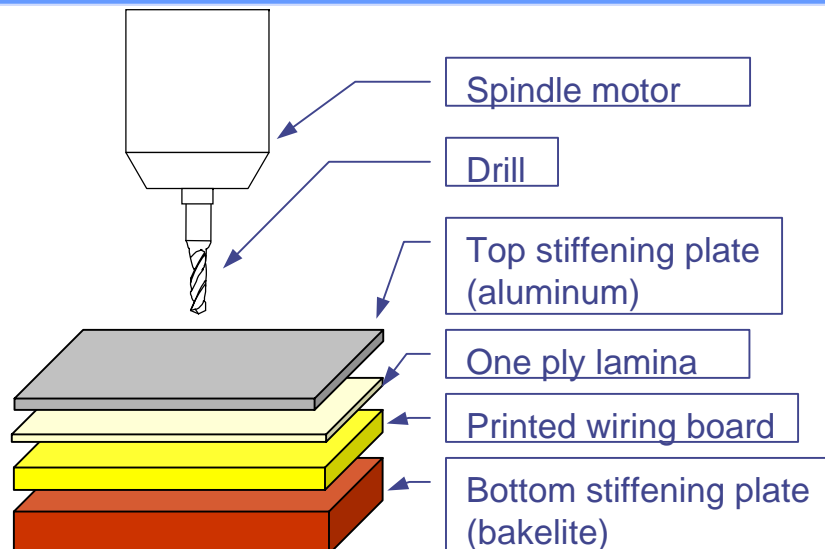
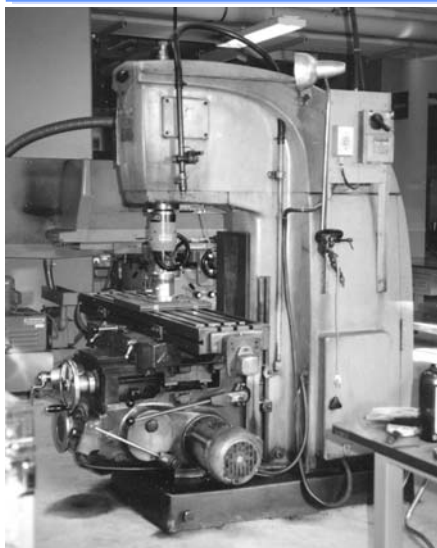


## Experimental method and cutting condition

Tool					Workpiece
					Glass cloth base epoxy resin copper clad laminate
					Thickness: 1.6[mm] JIS GE4F Glass cloth: E glass fiber IPC 7628 (JIS EP18B)
D [mm]	A [deg.]	La [mm]	Lb [mm]	SD [mm]	
1.00 <sup>+0</sup> <sub>-0.01</sub>	130	38.1±0.1	8	3.175	8 plies
					One ply lamina Thickness: 0.2[mm]

Spindle speed	Cutting speed	Feed speed	Feed rate
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
		318	63
7000	22.0	112	16
		140	20
		168	24
9000	28.3	144	16
		180	20
		216	24

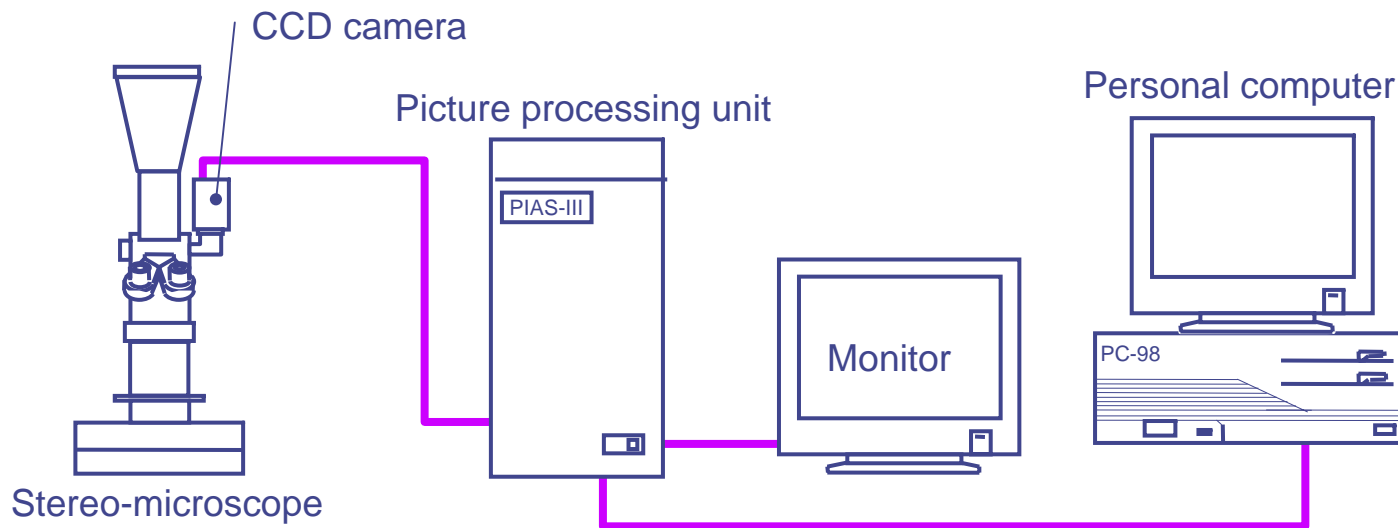
## Experimental unit & method



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

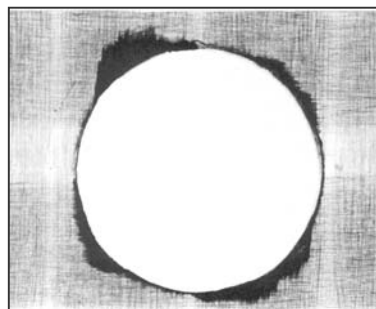
$$f = \frac{F}{N} \times 10^3$$

# Picture processing system

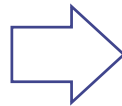


Specification of picture processing unit.

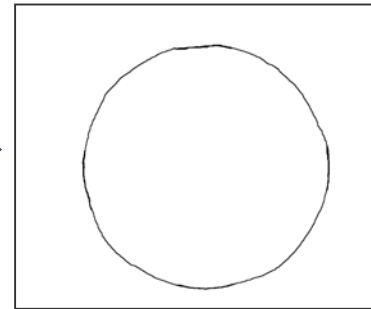
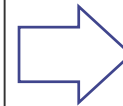
<i>Resolution</i>	512 × 512
<i>Luminance resolution</i>	RGB:8 bits 256 level
<i>Size of a picture element</i>	3 × 3 μm
<i>Aspect ratio</i>	1:1
<i>Picture memory capacity</i>	12 planes



(a) Micrograph

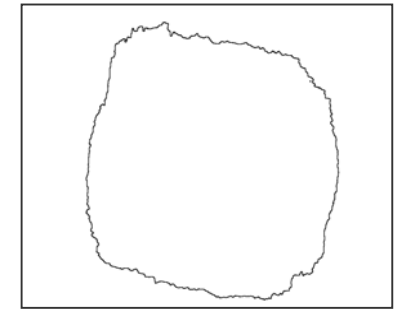


(b) Binary picture



(c) Configuration of drilled hole

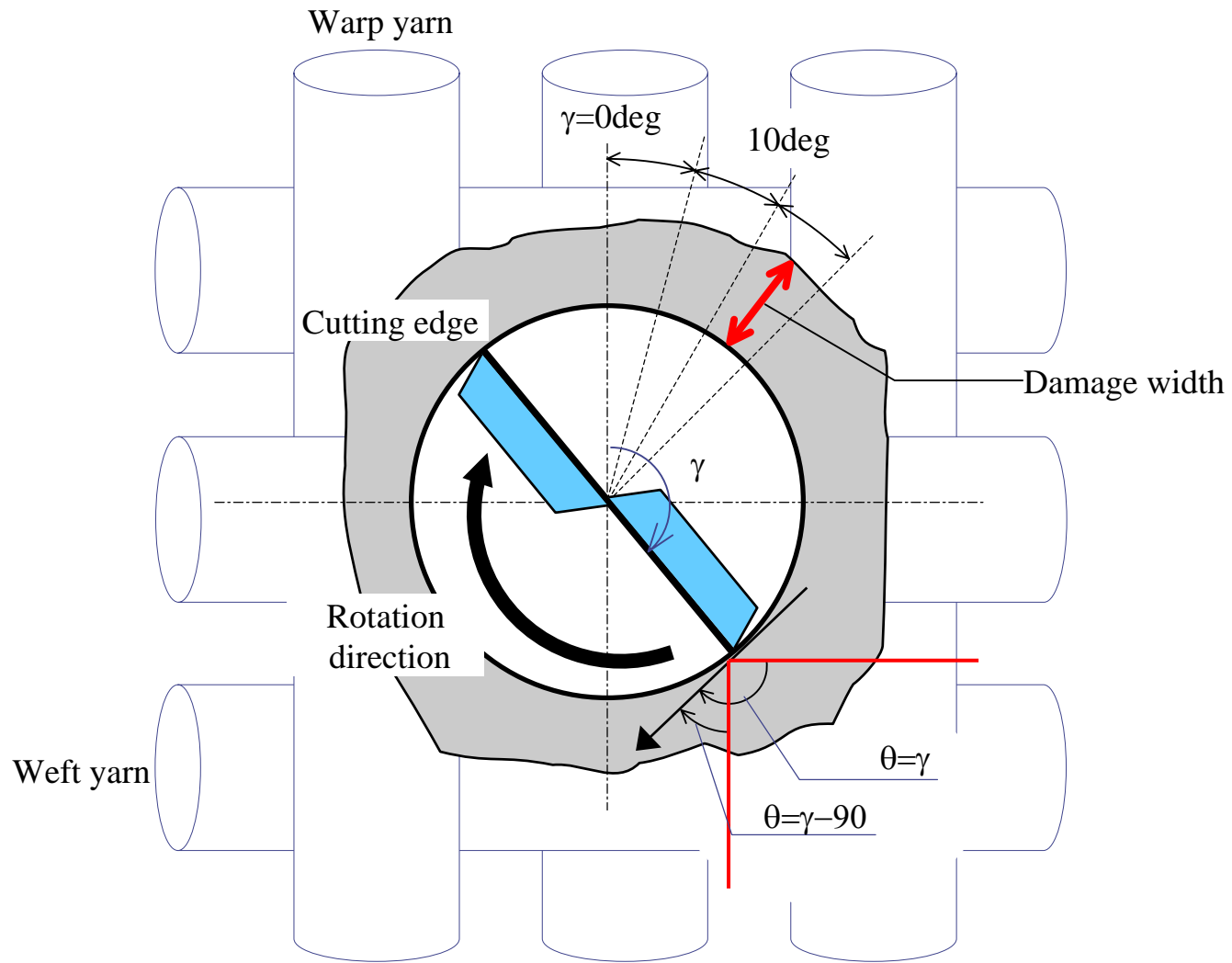
+



(d) Configuration of damaged area

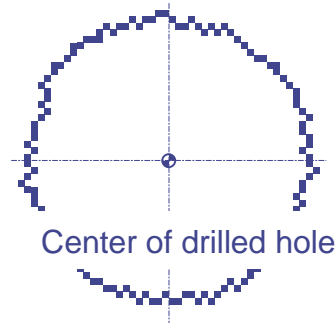
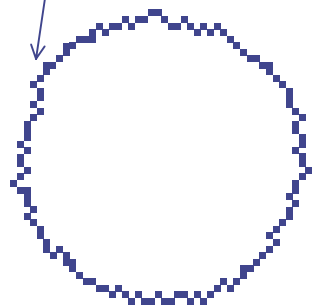


# Definition of damage width, rotation angle $\gamma$ and fiber angle $\theta$

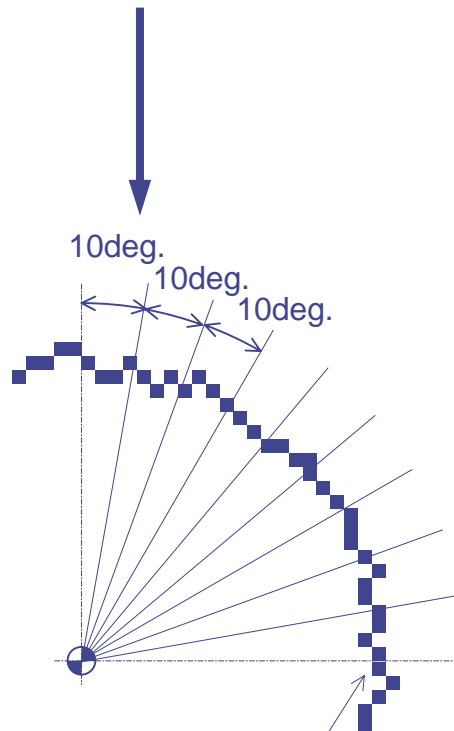


# Calculation method of damage width

Configuration of drilled hole



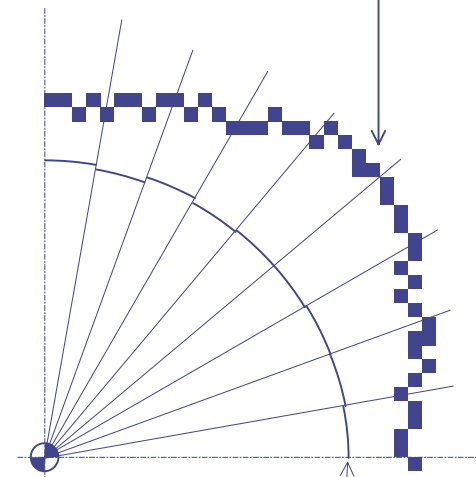
$$\begin{aligned}
 &(x_k, y_k) \\
 &k = 1 \sim m \\
 &x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \\
 &\begin{pmatrix} \sum x_k^2 & \sum x_k y_k & \sum x_k \\ \sum x_k y_k & \sum y_k^2 & \sum y_k \\ \sum x_k & \sum y_k & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum (-x_k^2 - x_k y_k^2) \\ \sum (-x_k^2 y_k - y_k^2) \\ \sum (-x_k^2 - y_k^2) \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$



Configuration of drilled hole

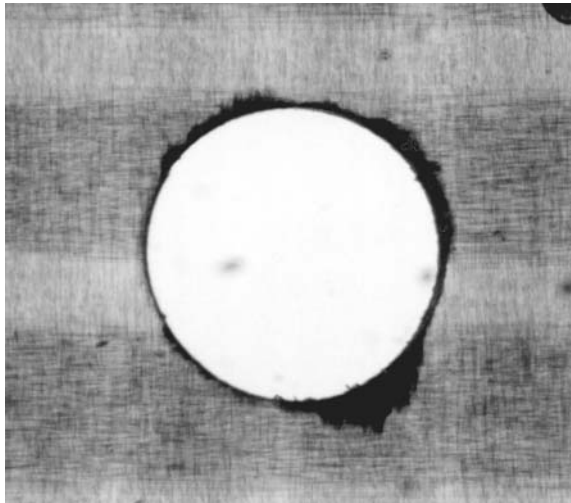


Configuration of damage area

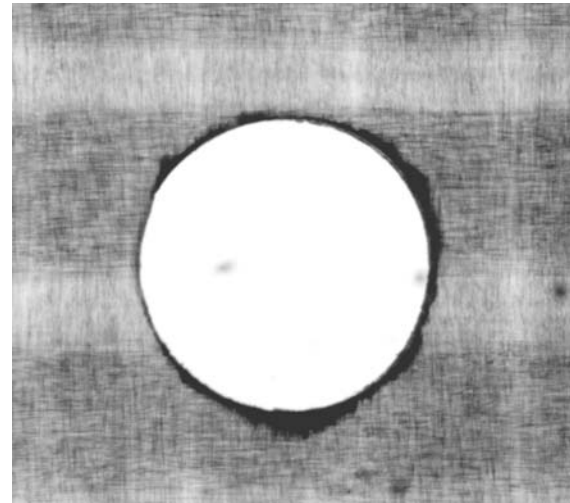


Configuration of drilled hole  
(every 10deg.)

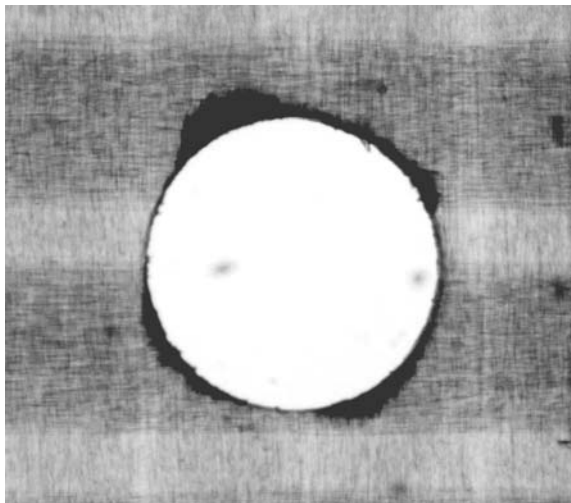
# Micrographs of drilled lamina



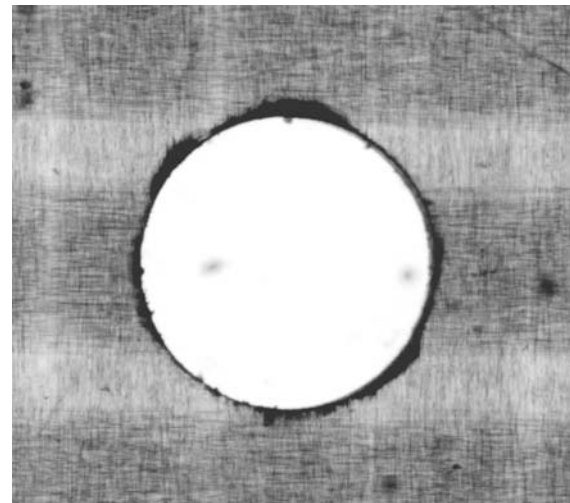
(a)



(b)



(c)

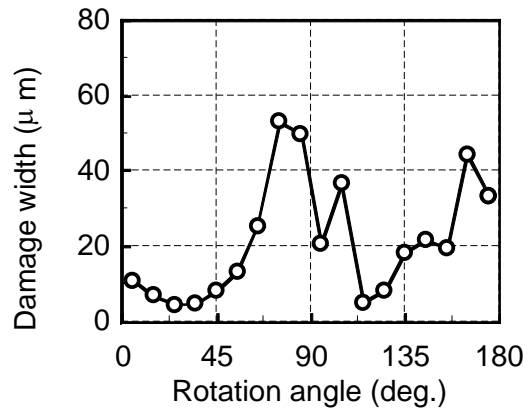


(d)

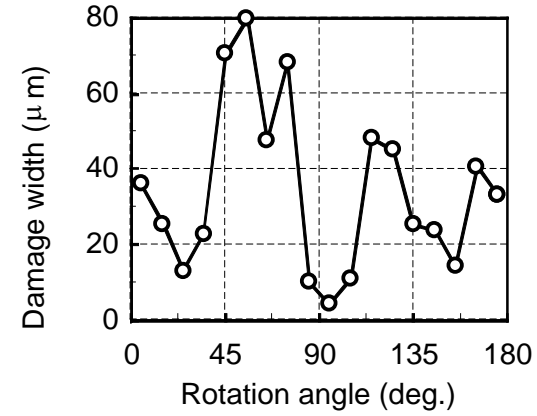
$V=15.7\text{m/min}$   
 $f=63\mu\text{m/rev}$

200 $\mu\text{m}$   
|-----|

## Relation between damage width and rotation angle

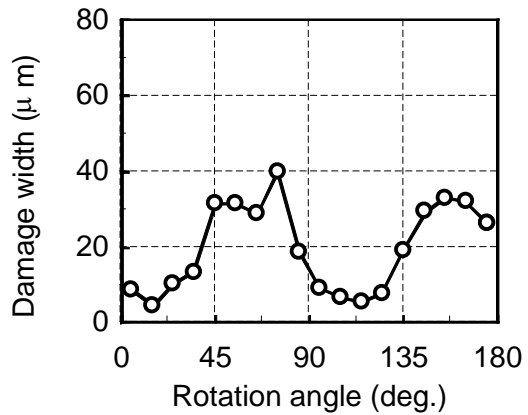


(a) sample 1



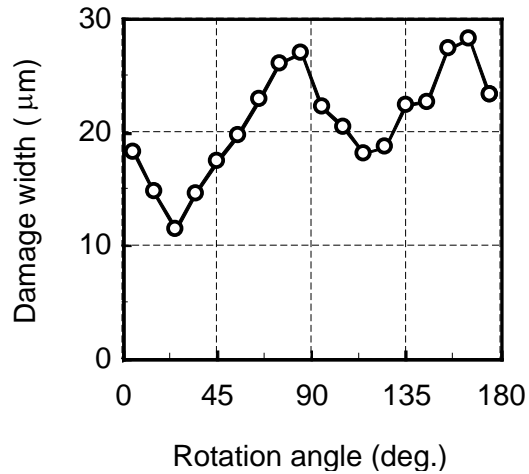
(b) sample 2

$V=15.7\text{m/min}$   
 $f=63\mu\text{m/rev}$

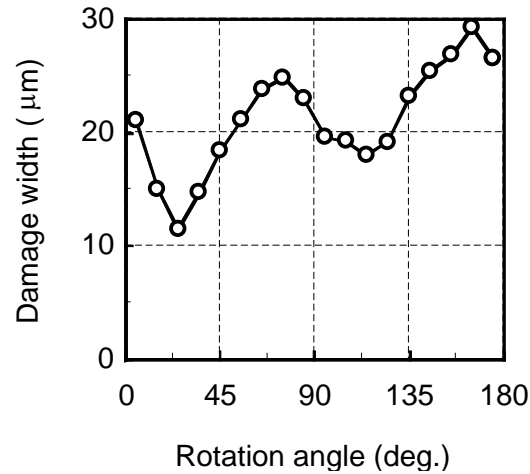


(c) sample3

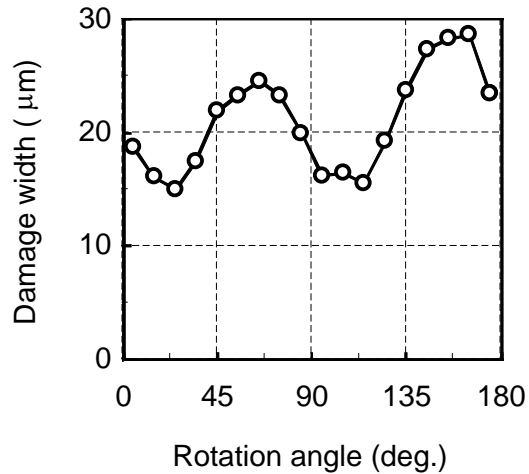
# Relation between damage width and rotation angle



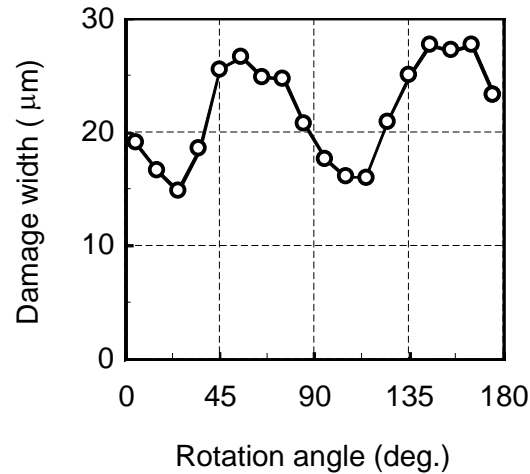
(a) Average of 10 samples



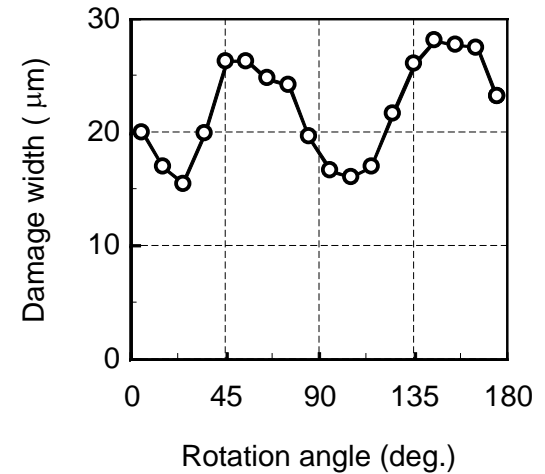
(b) Average of 20 samples



(c) Average of 30 samples



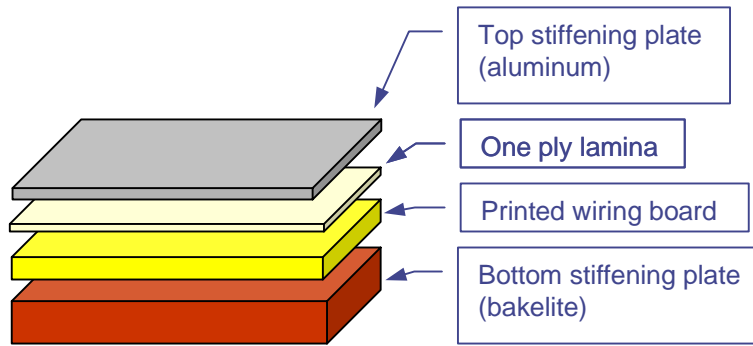
(d) Average of 40 samples



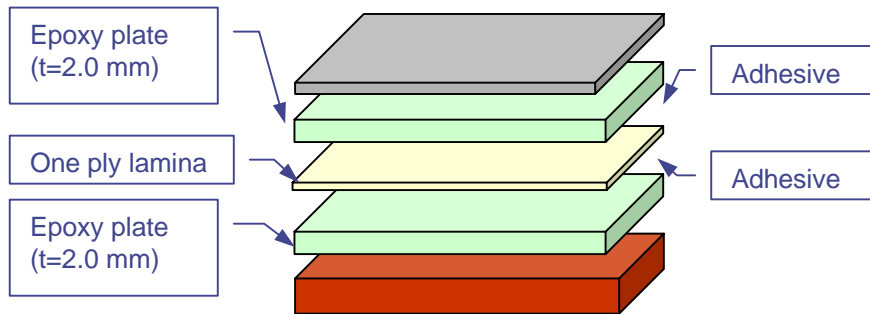
(e) Average of 50 samples

$V=15.7\text{m/min}$   
 $f=28\mu\text{m/rev}$

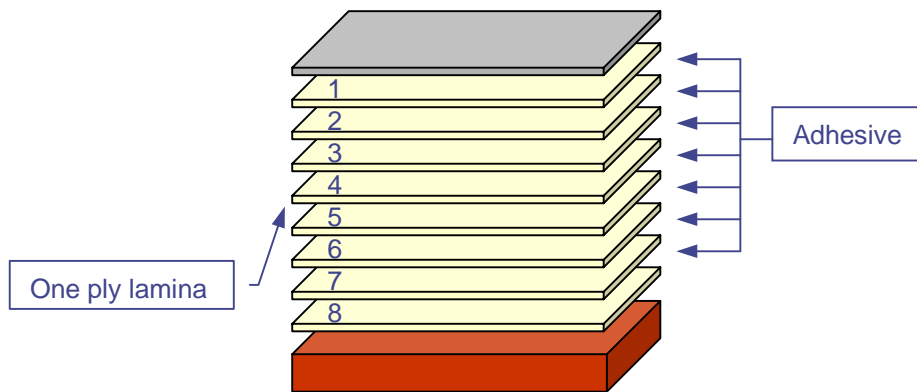
# Verification experiment



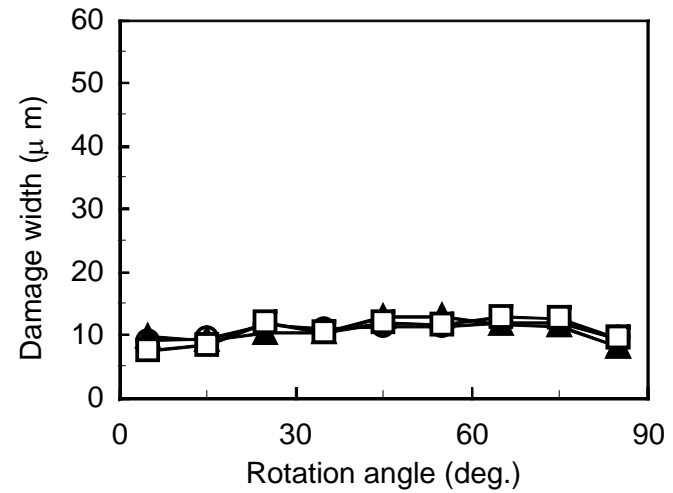
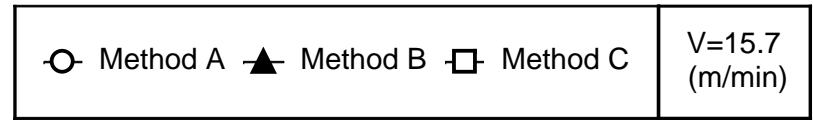
(a) Method A



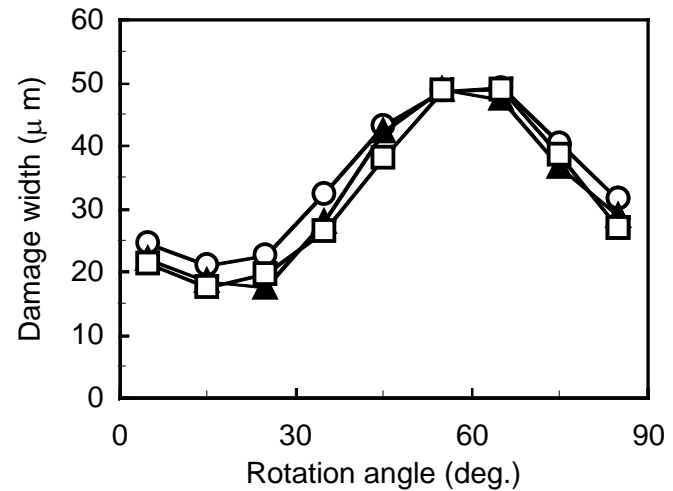
(b) Method B



(c) Method C



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

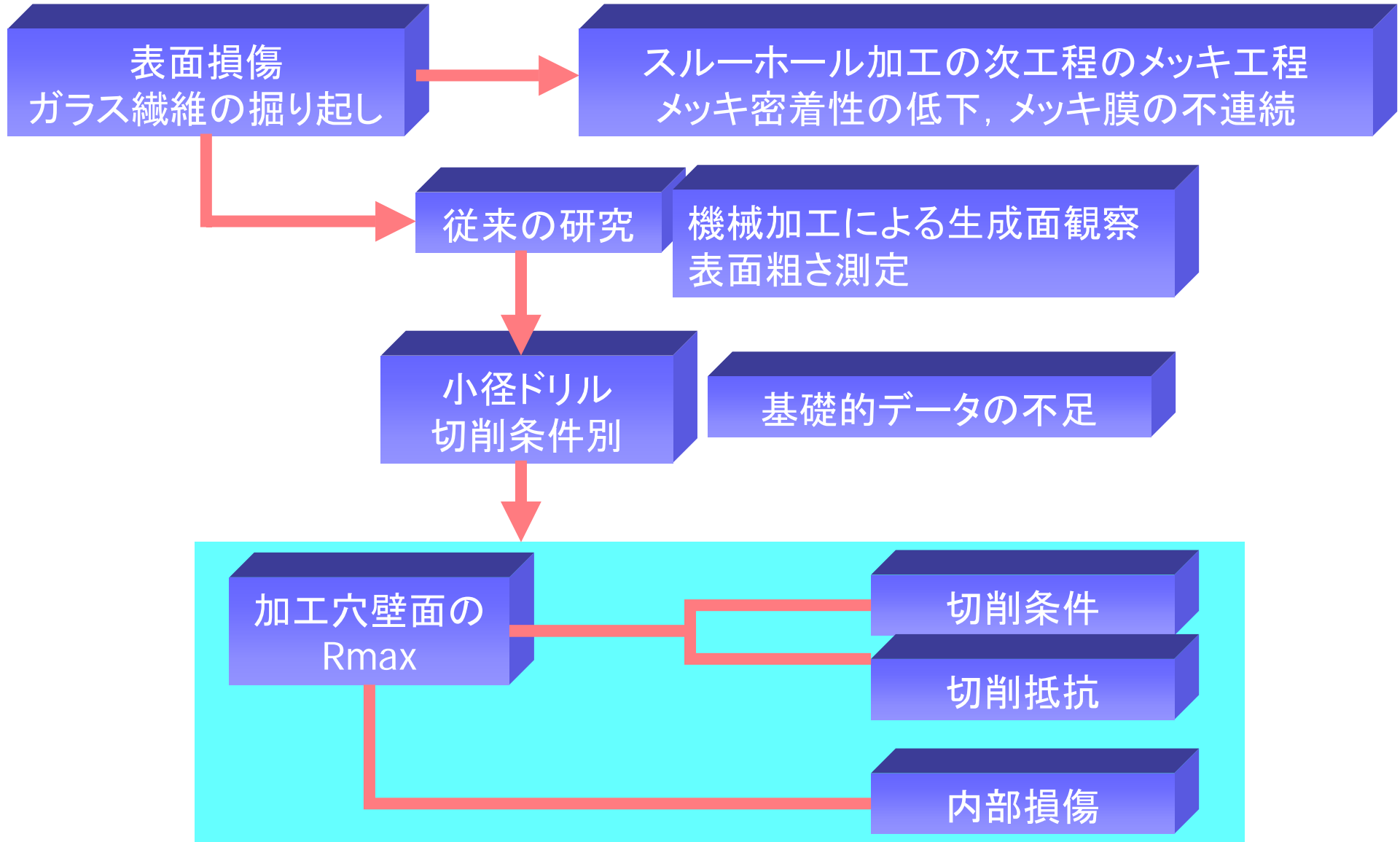


(b)  $f=63\mu\text{m/rev}$

## 第2章 結言

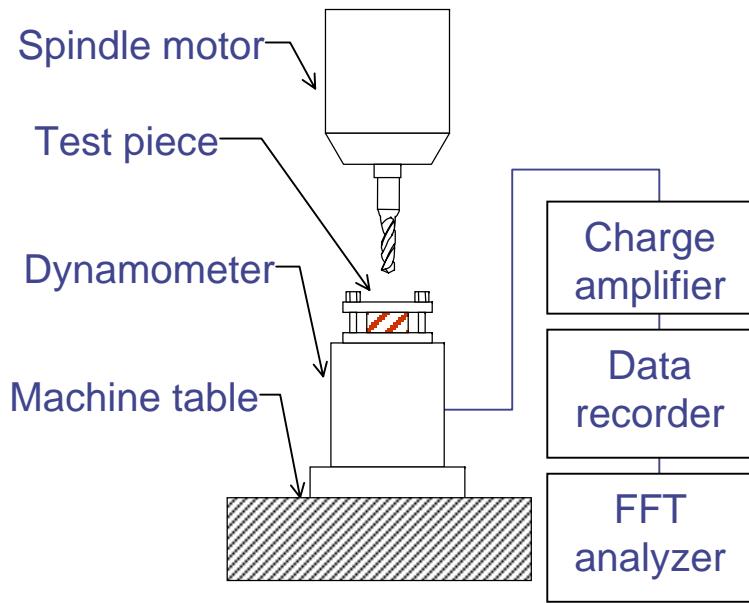
- ◆ 内部損傷の評価に画像処理を適用することは、多数のブランクの損傷を迅速に評価可能であり、ドリル加工時の加工穴の内部損傷の評価に有効である。また、加工穴壁面での位置を定義するために**回転角**、ドリル切れ刃と繊維方向の関係を**繊維角**及び内部損傷の大きさを**損傷幅**とすることで内部損傷の発生形態が高い精度で測定できることを示した。
- ◆ 内部損傷の発生形態はサンプルによって非常に**ばらつく**ことが分かった。しかしサンプルを平均すると、内部損傷の発生形態に傾向が見られ、加工穴を4分割することで評価できることが分かった。
- ◆ 検証実験を行った結果、積層板に発生する内部損傷を**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

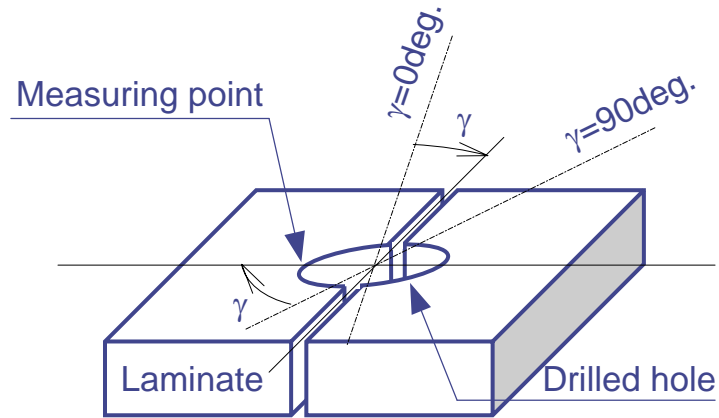




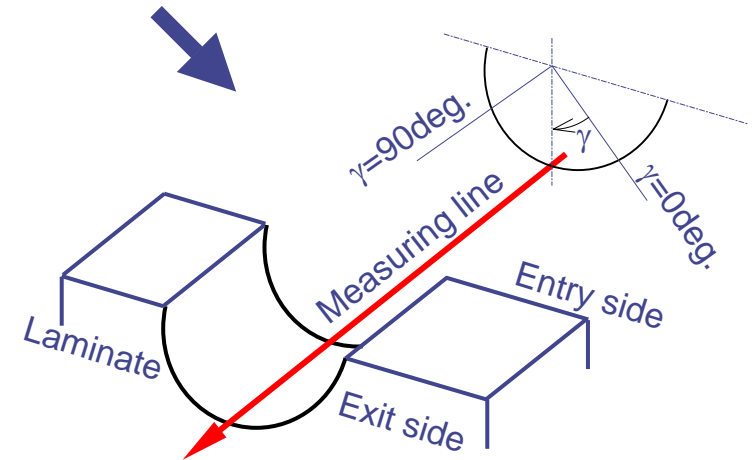
# Measuring methods of thrust force and surface roughness



Thrust force



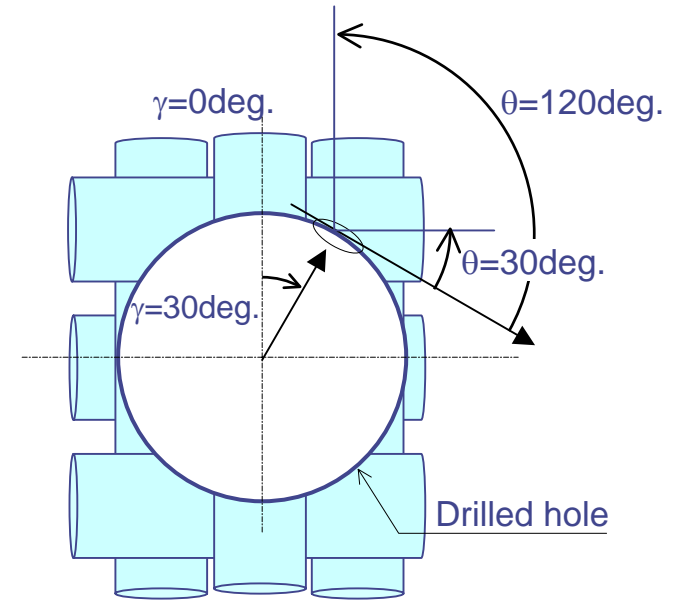
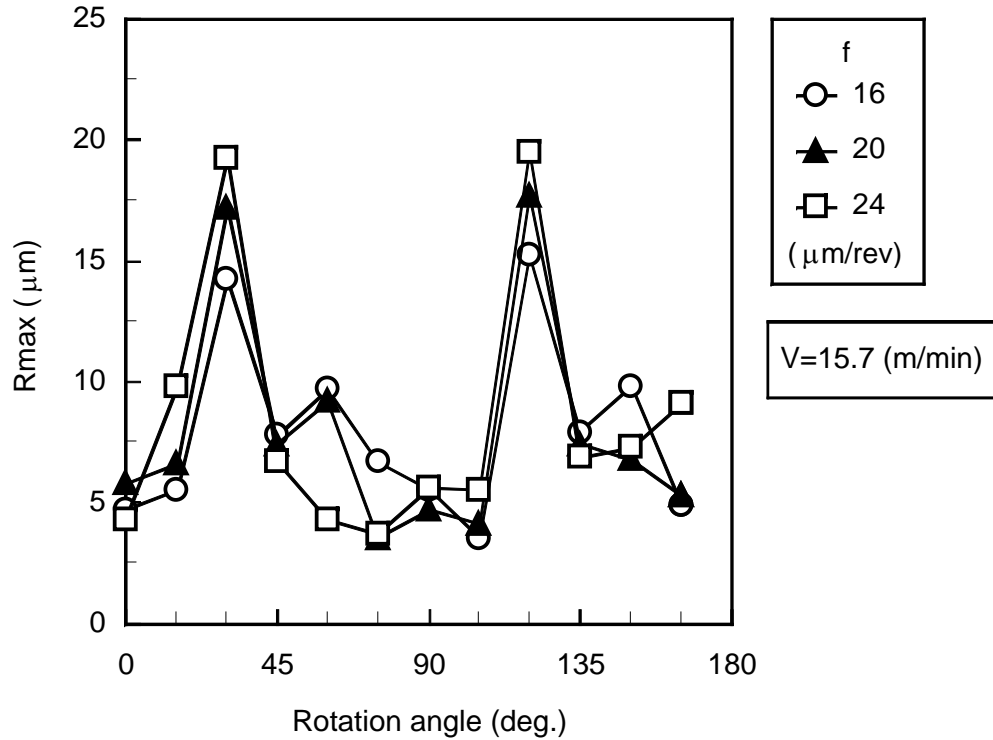
(a) Cutting of drilled hole



(b) Measuring line of surface roughness

Surface roughness

# Relation between $R_{max}$ and rotation angle

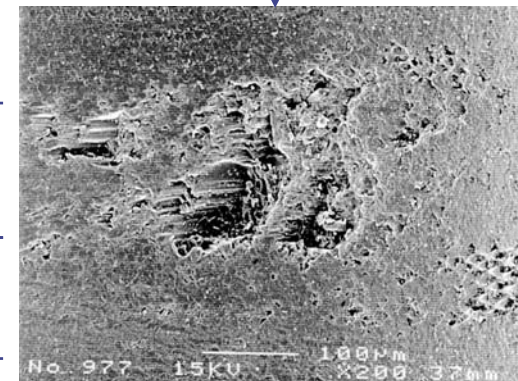


Measuring direction of surface roughness (Feed direction)

fiber angle

30deg.

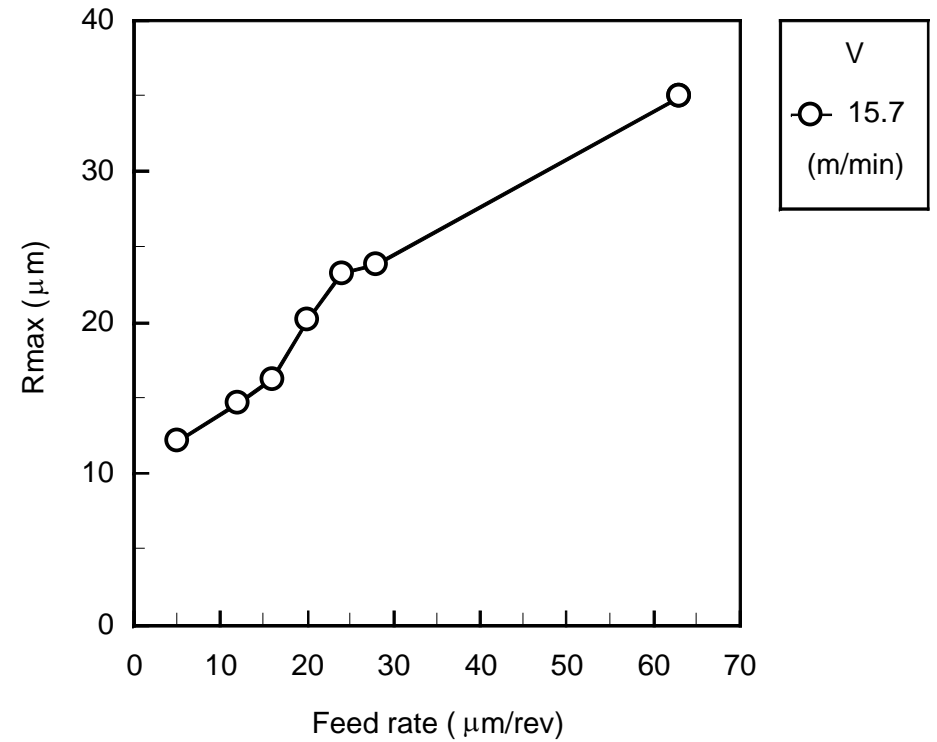
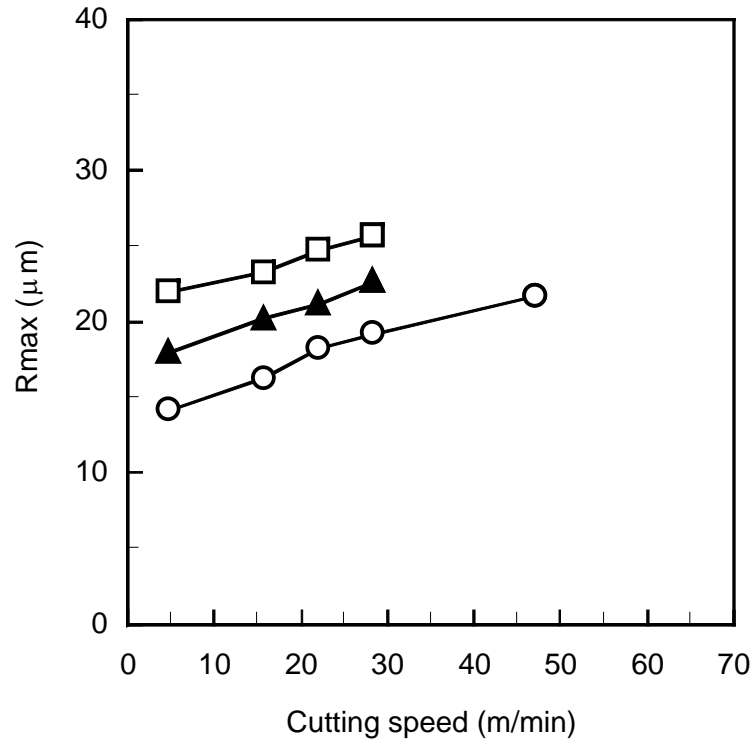
120deg.



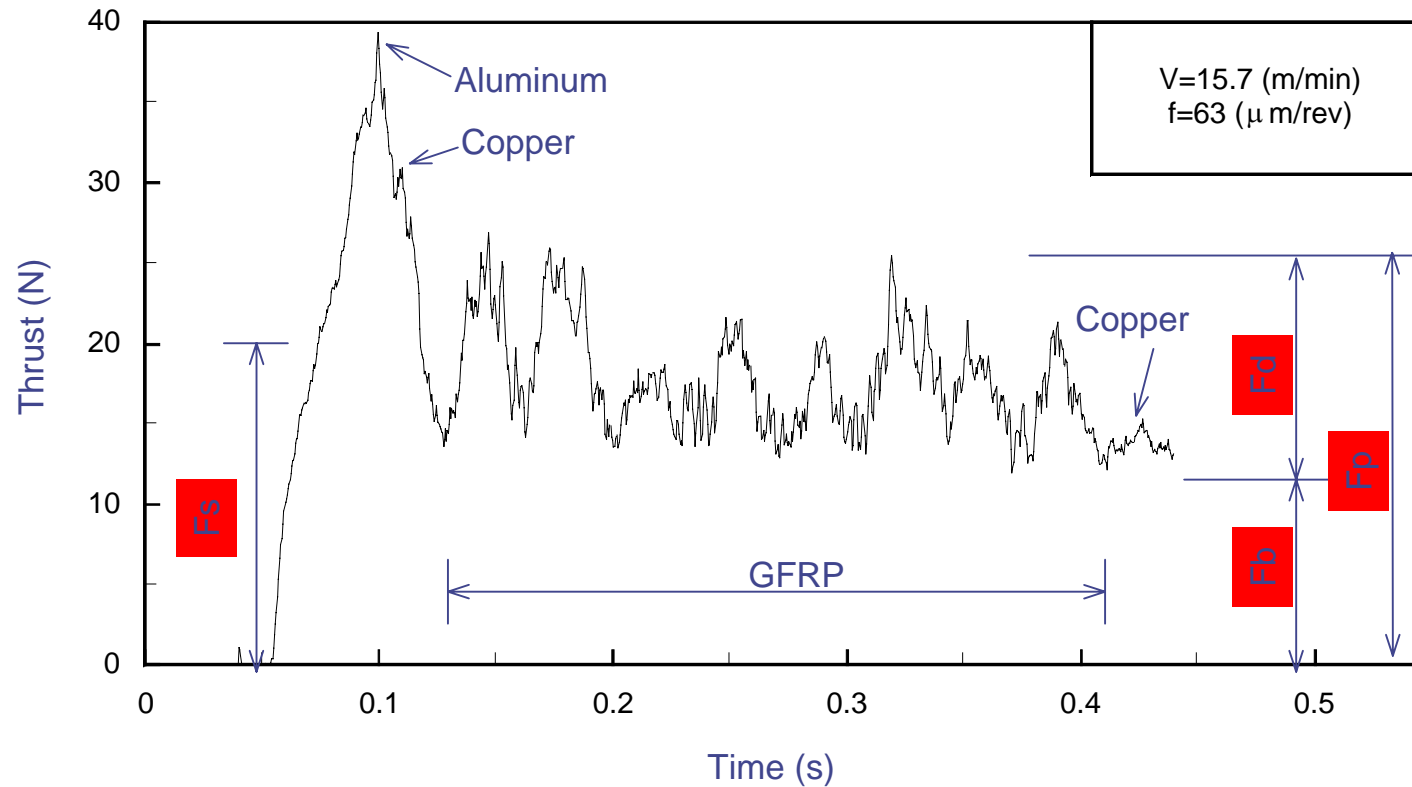
(b)  $\gamma = 30$  (deg.)

SEM micrograph of drilled hole wall  
( $V = 15.7\text{m/min}$ ,  $f = 20\mu\text{m/rev}$ )

## Relation between $R_{max}$ and cutting condition



## Measured thrust force (definitions of $F_s$ , $F_d$ , $F_p$ , $F_b$ )

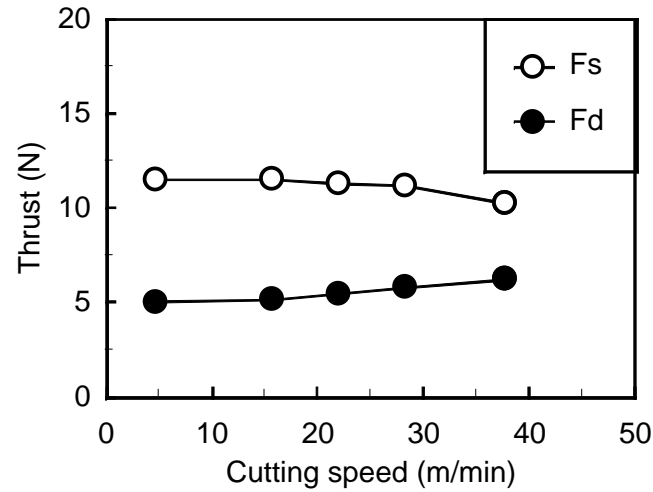
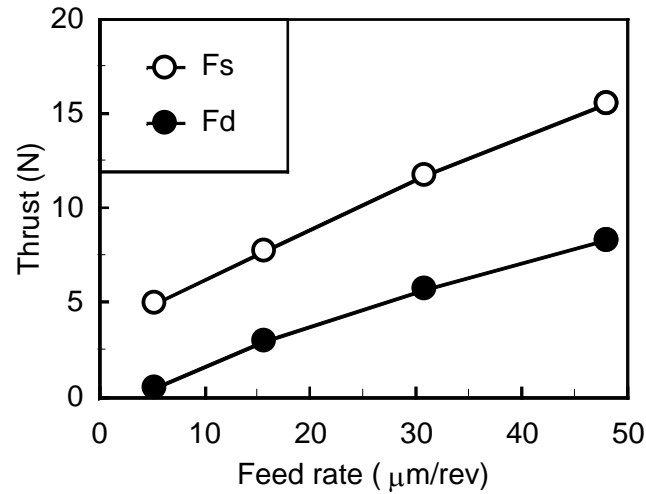


$F_s$  静的成分  
 $F_d$  動的成分  
 $F_p$  最大值  
 $F_b$  最小值

$$F_s = \frac{F_p + F_b}{2}$$

$$F_d = F_p - F_b$$

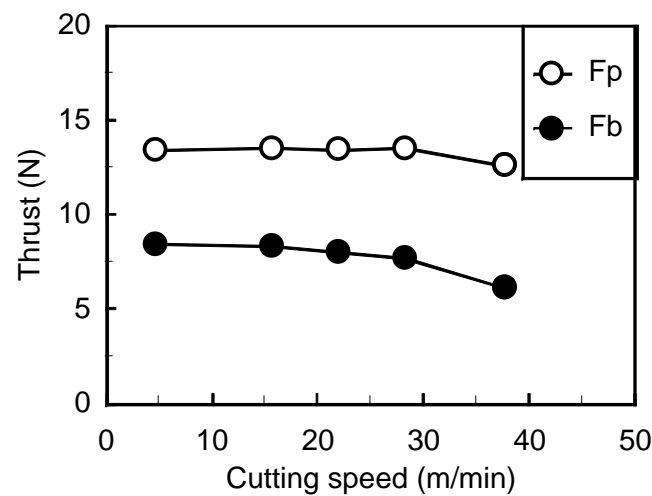
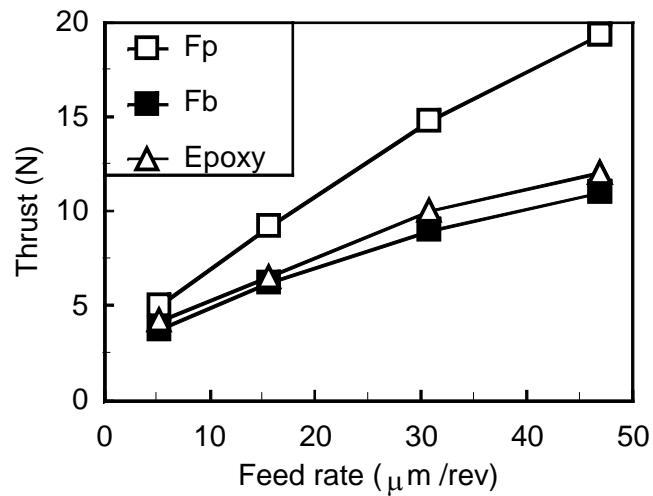
## Relation between thrust force and cutting condition



Fs 静的成分  
Fd 動的成分

$$F_s = \frac{F_p + F_b}{2}$$

$$F_d = F_p - F_b$$

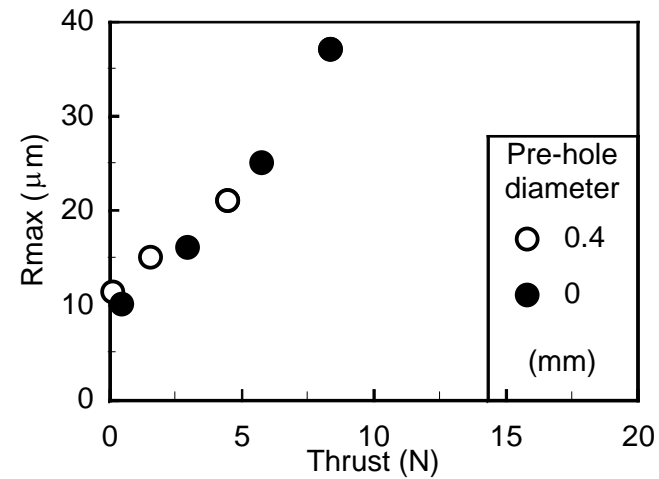
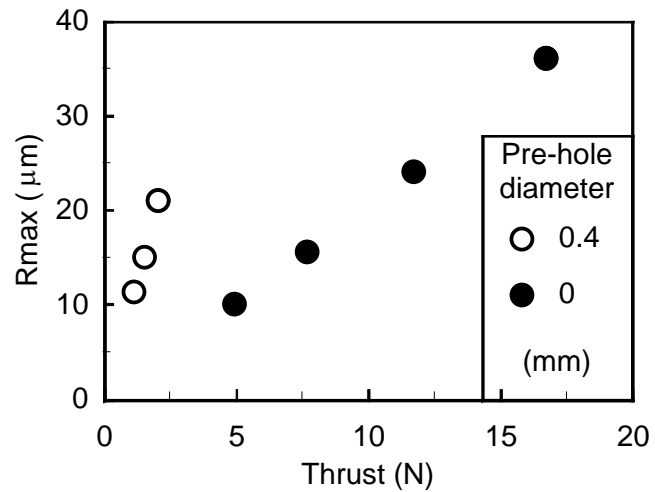
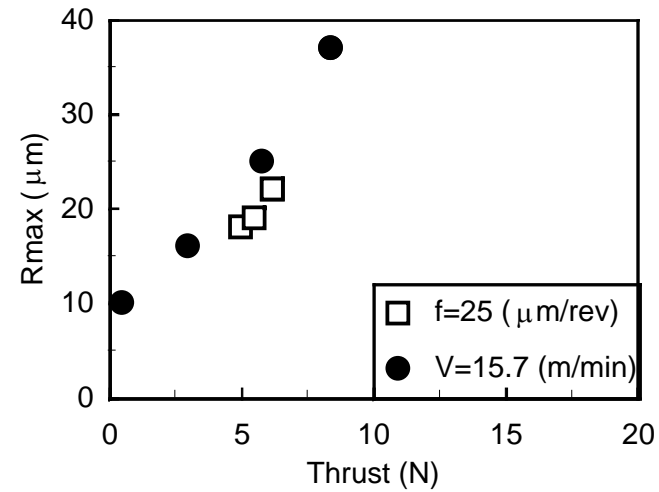
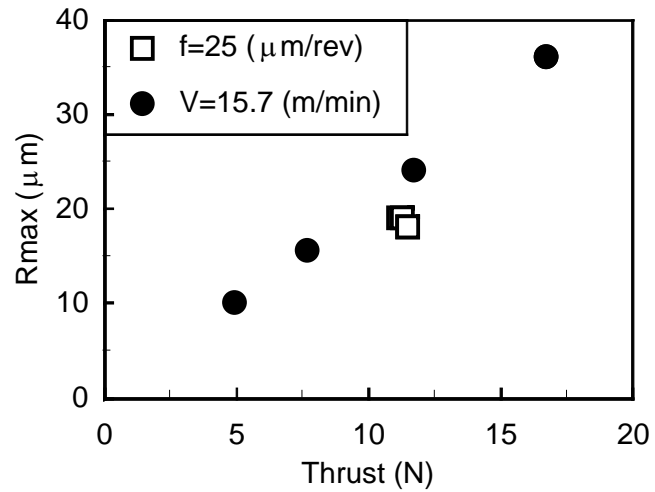


Fp 最大值  
Fb 最小值

(a)  $V=15.7$  m/min

(b)  $f=25$  μm/rev

## Relation between Rmax and thrust force



(a)  $F_s$  (静的成分)

(b)  $F_d$  (動的成分)

$$F_s = \frac{F_p + F_b}{2}$$

$$F_d = F_p - F_b$$

## Relation between damage width and Rmax

表面粗さ

回転角毎に加工穴を切断

導電性への影響  
(メッキ性)

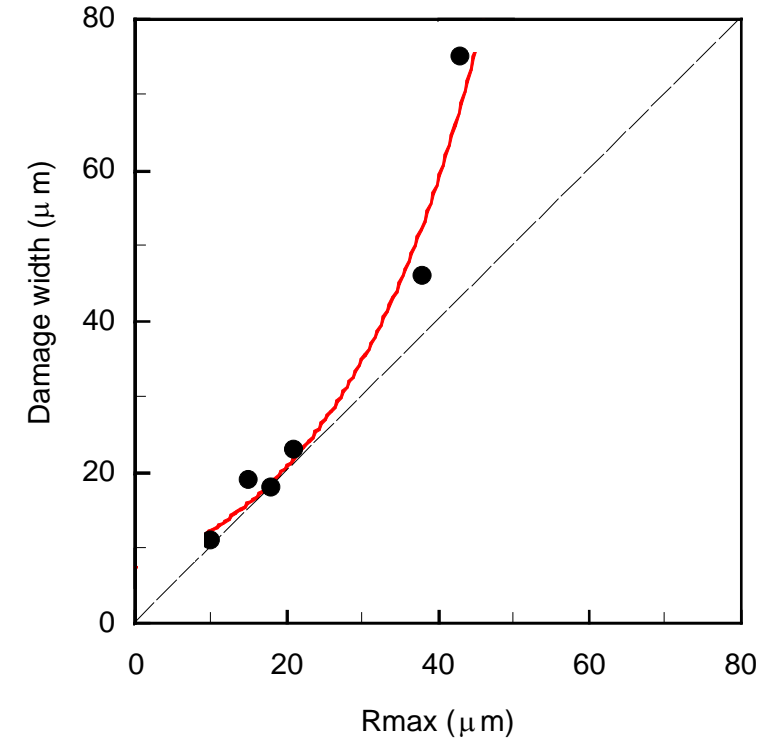
目視で測定位置を決定

- ✓1つの加工穴全周の測定は困難
- ✓測定精度の低下
- ✓手間がかかる

内部損傷

機器の寿命への影響  
(イオンマイグレーション)  
剛性低下

定量的  
高精度  
迅速

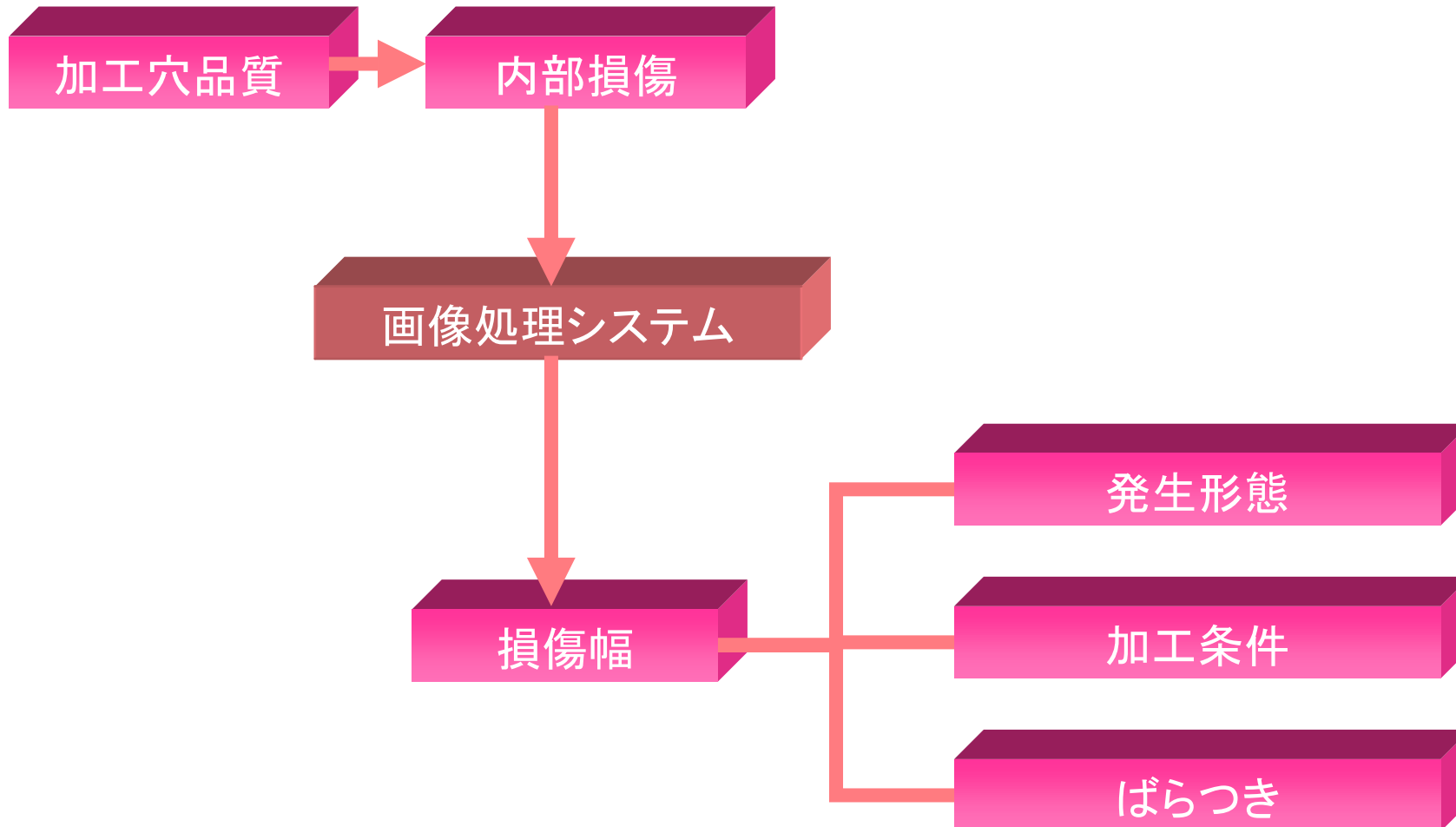


## 第3章 結言

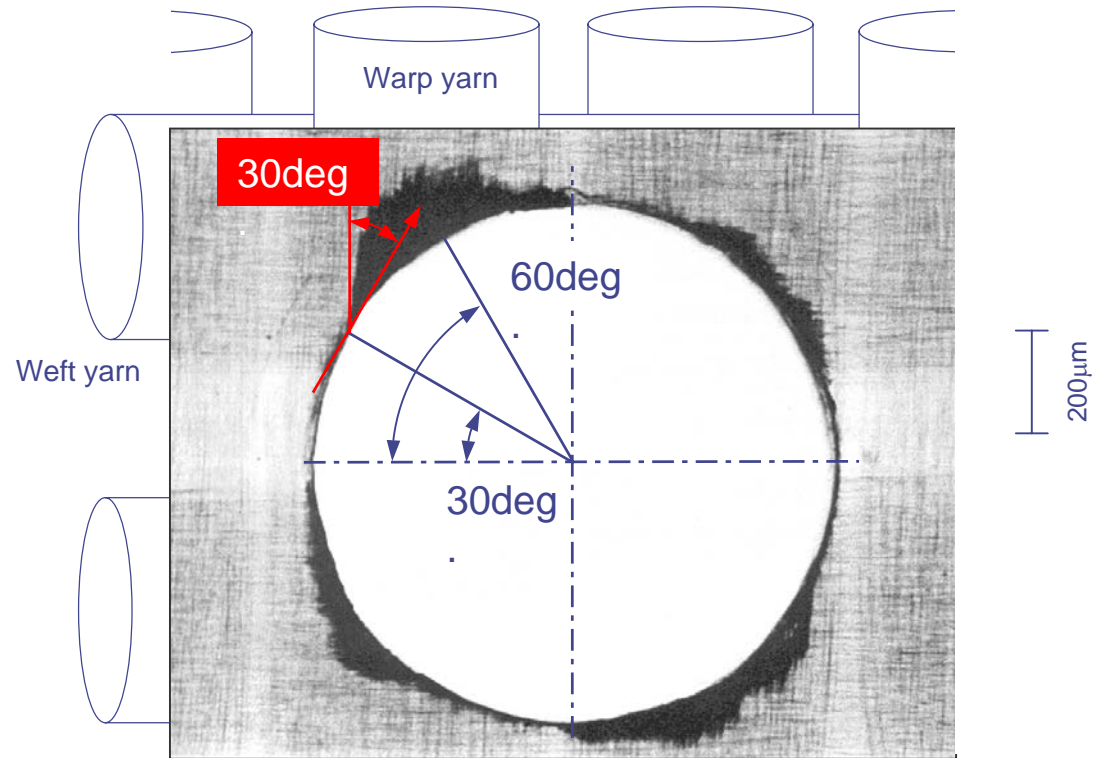
- ◆ クロス材のドリル送り方向の加工穴表面粗さが悪化するのとは同一回転角に存在する2つの繊維角の繊維で切削状態に差が生じるためである。特に、**回転角30deg.において繊維角30deg.方向の繊維のみ**が掘り起こされるため最も悪くなる。
- ◆ GFRP切削時のドリル送り方向の切削抵抗(スラスト)の特徴を**静的成分( $F_s$ )と動的成分( $F_d$ )**に分離することにより解明し、切削条件が切削抵抗に与える影響の要因を明らかにした。
- ◆ 加工穴表面粗さは、**切削速度よりも送り量の影響が大きい**。これは、切削抵抗が切削速度よりも送り量の影響を大きく受けるためである。したがって、穴表面の改善には送り量を低減することが有効である。
- ◆ 切削抵抗の**動的成分( $F_d$ )**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。
- ◆ 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。



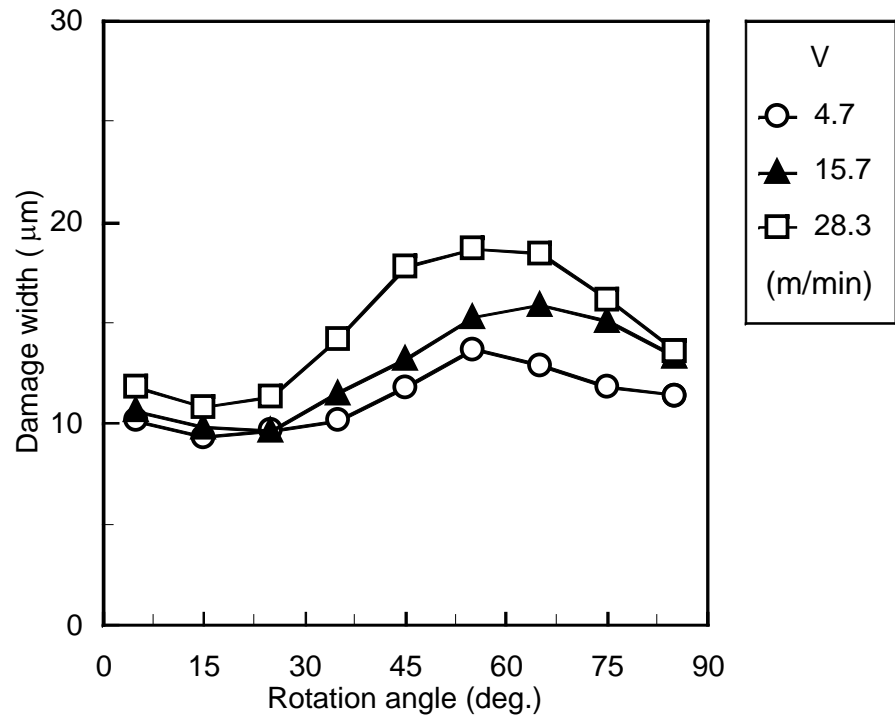
## 第4章 内部損傷の発生形態と加工穴品質の信頼性



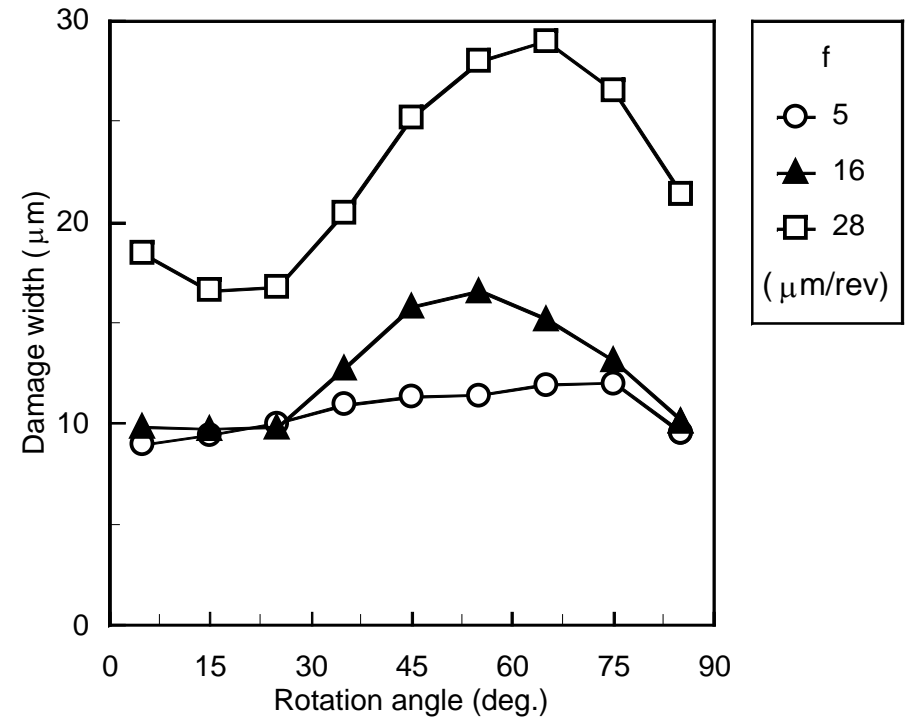
*Micrograph of drilled one ply lamina ( $V=15.7\text{m/min}$ ,  $f=63\mu\text{m/rev}$ )*



## Relation between damage width and rotation angle

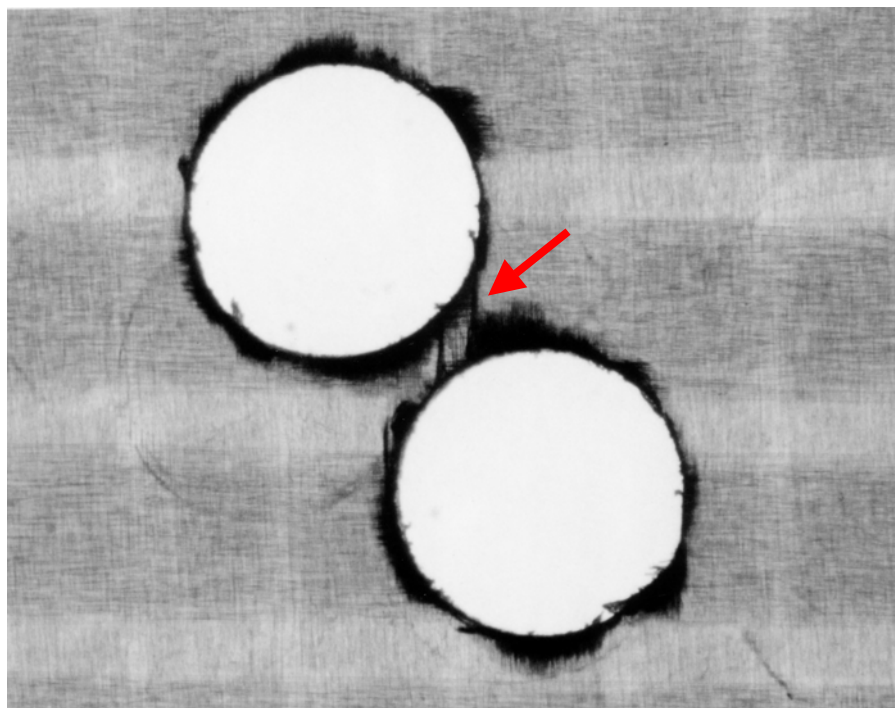


(a)  $f = 20 \mu\text{m/rev}$



(b)  $V = 15.7 \text{ m/min}$

*Micrograph of drilled one ply lamina*

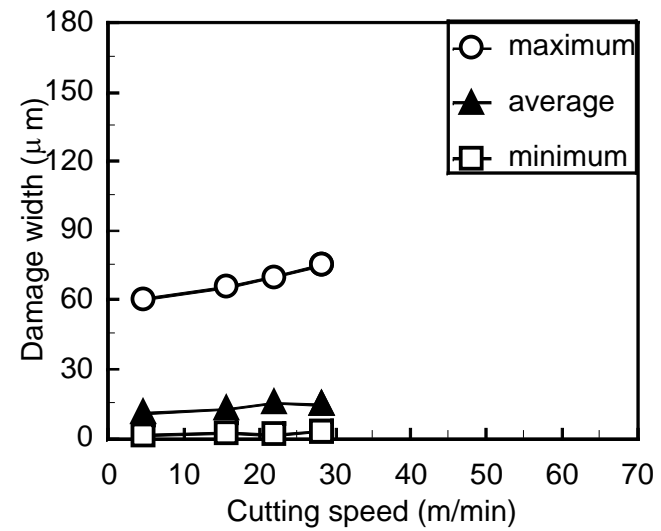
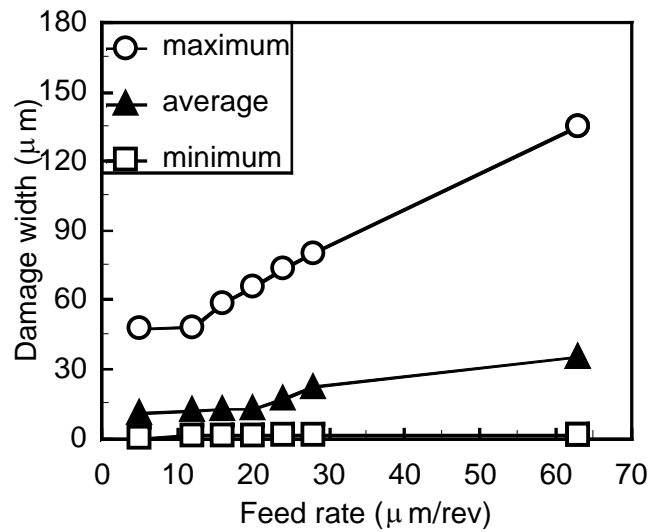
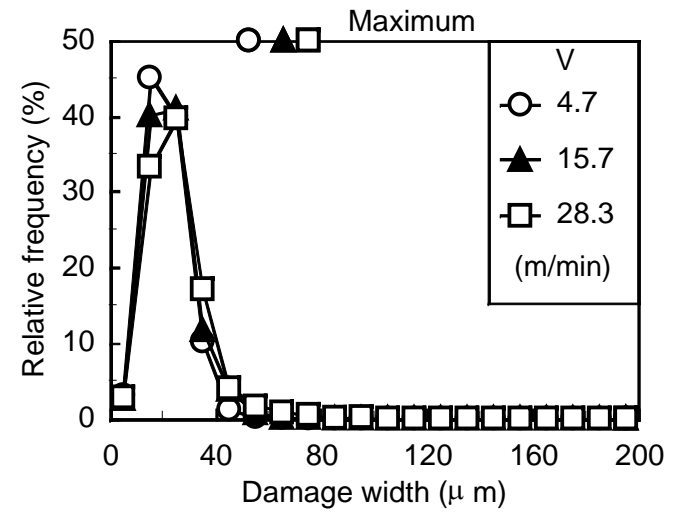
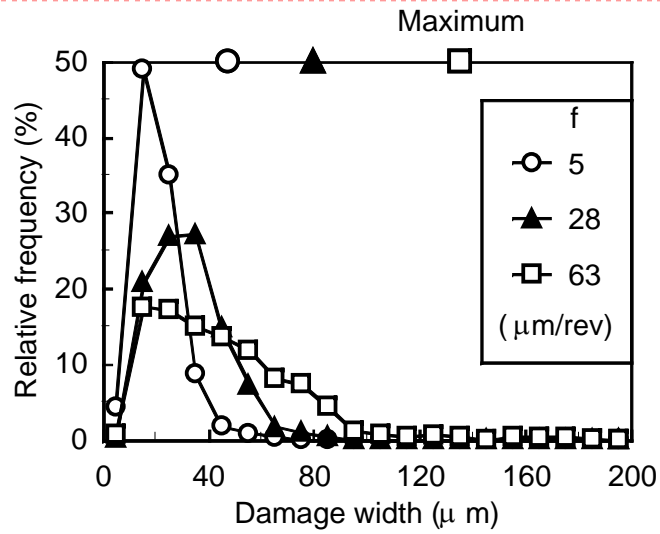


$V=15.7$  (m/min)  
 $f=63$  ( $\mu\text{m}/\text{rev}$ )

200 $\mu\text{m}$   
┆┆

イオンマイグレーション発生誘発  
剛性低下

# Relation between relative frequency and damage width



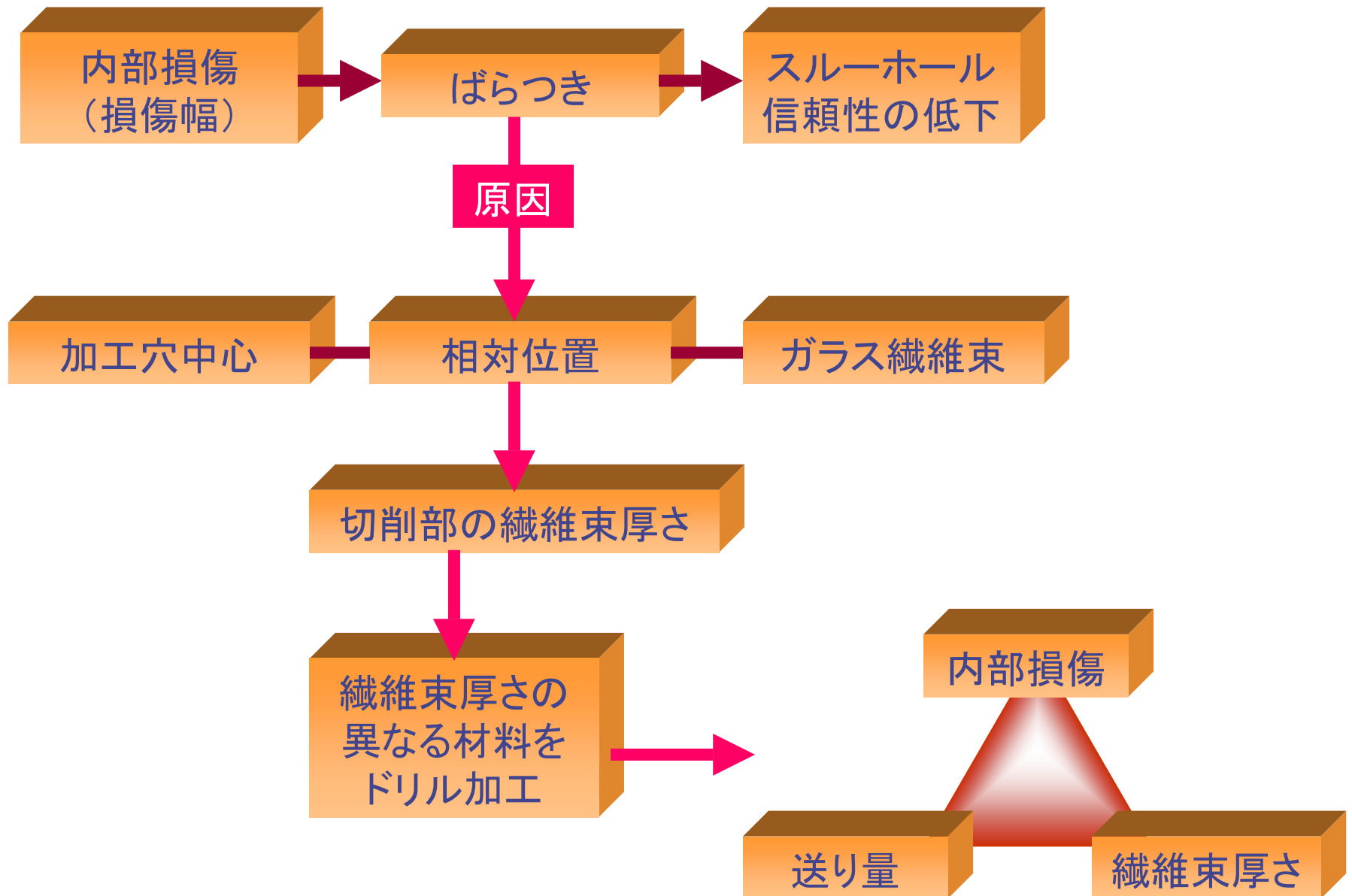
(a) V=15.7m/min

(b) f=20μm/rev

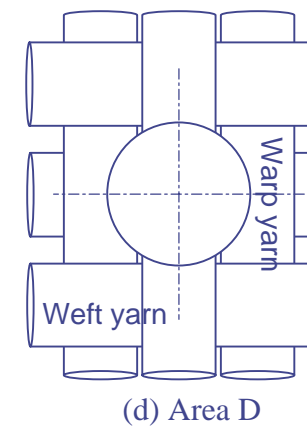
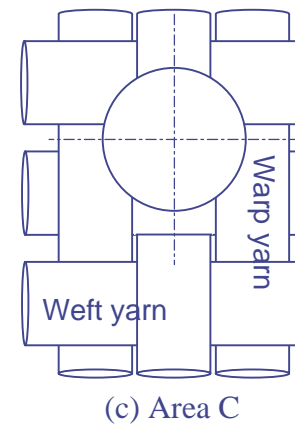
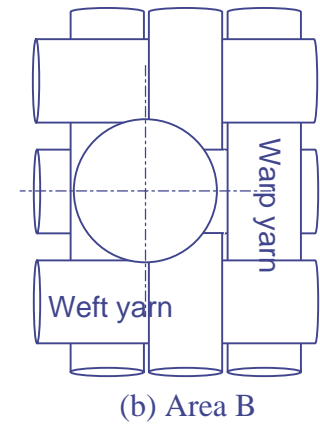
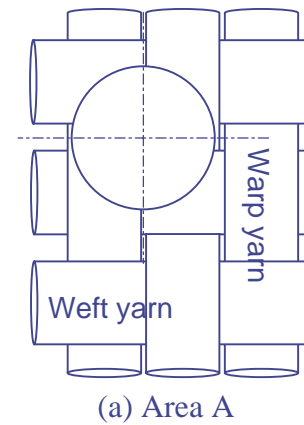
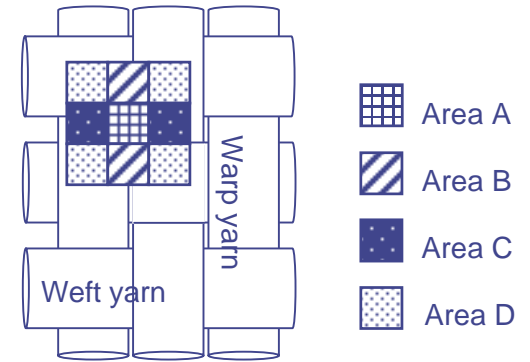
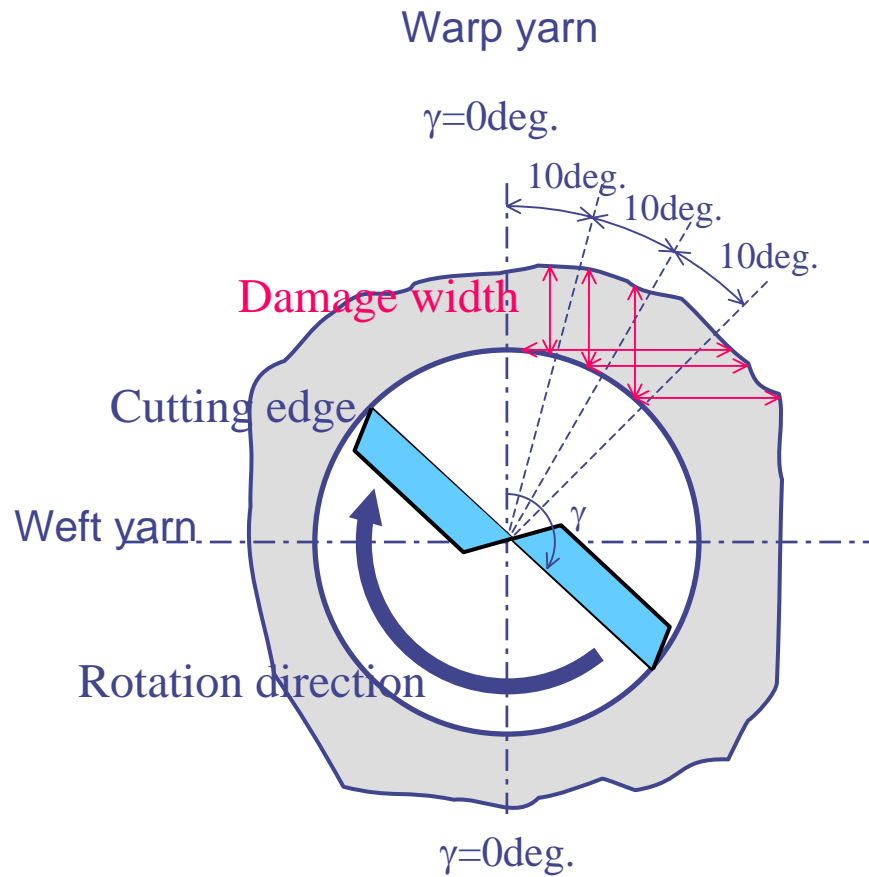
## 第4章 結言

- ◆ 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, ガラスクロスの内**部**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.
- ◆ 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.
- ◆ 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.

## 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

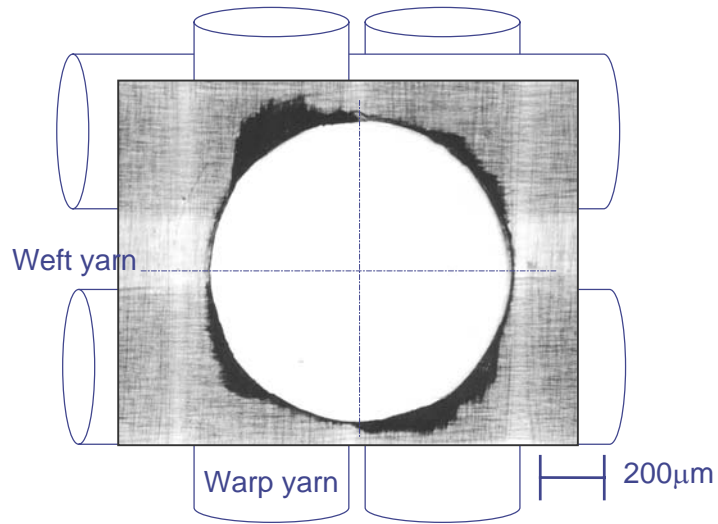


# Damage width and classification of center of drill to glass cloth

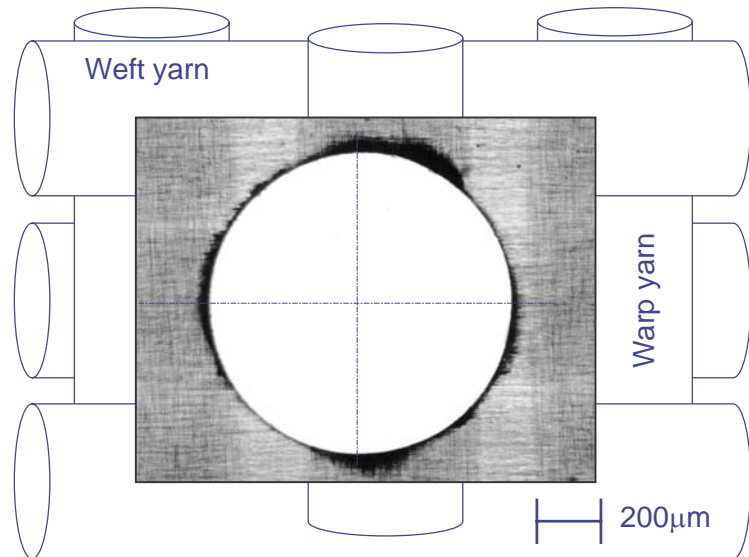




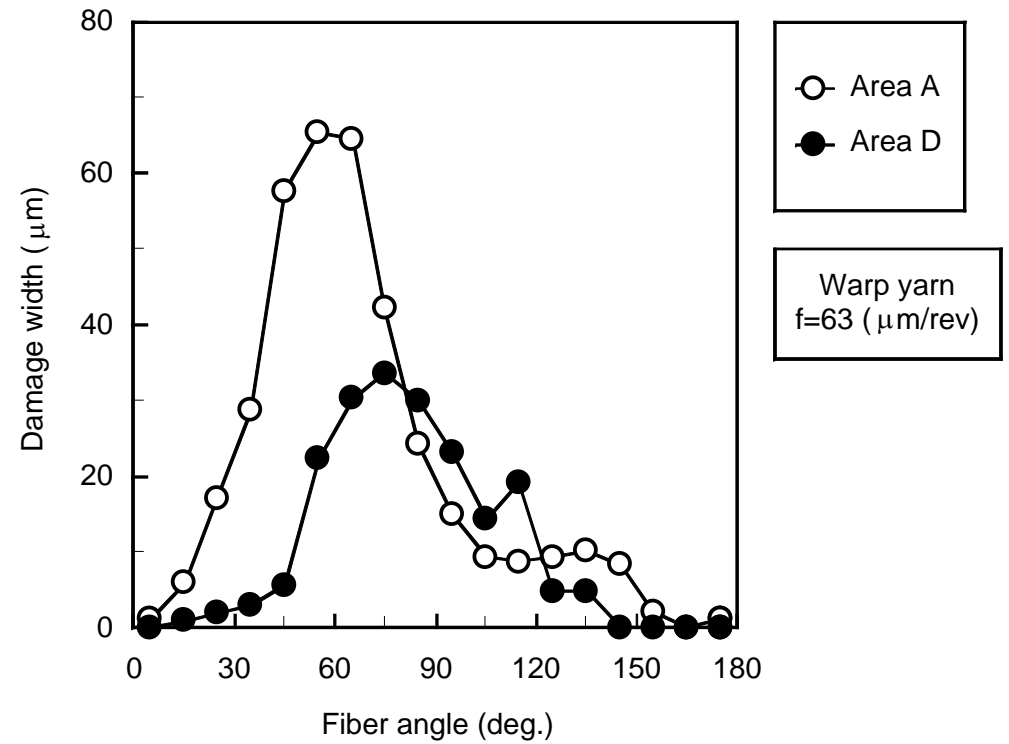
*Micrographs of drilled one ply lamina ( $V=15.7\text{m/min}$ ,  $f=63\mu\text{m/rev}$ )*



(a) Area A

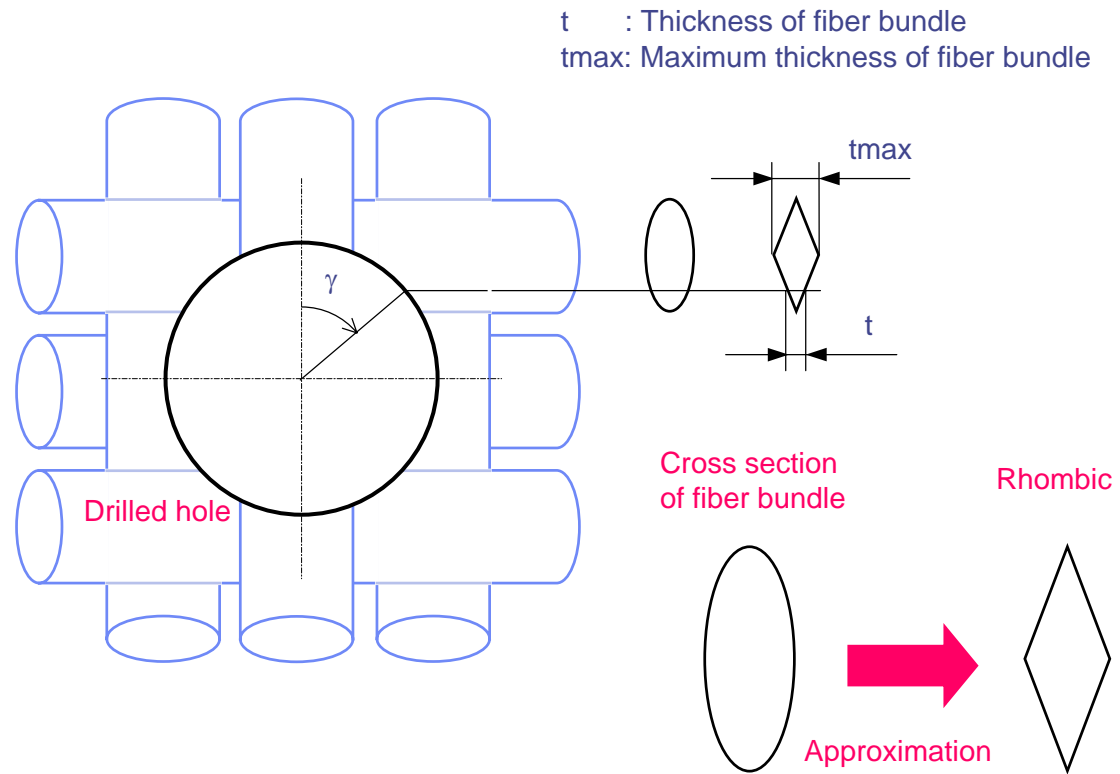


(b) Area D

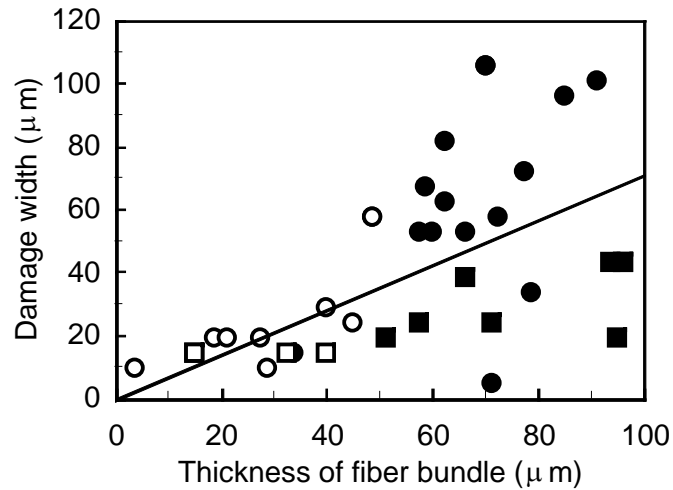
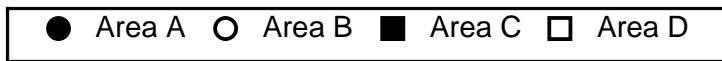


Relation between damage width and fiber angle

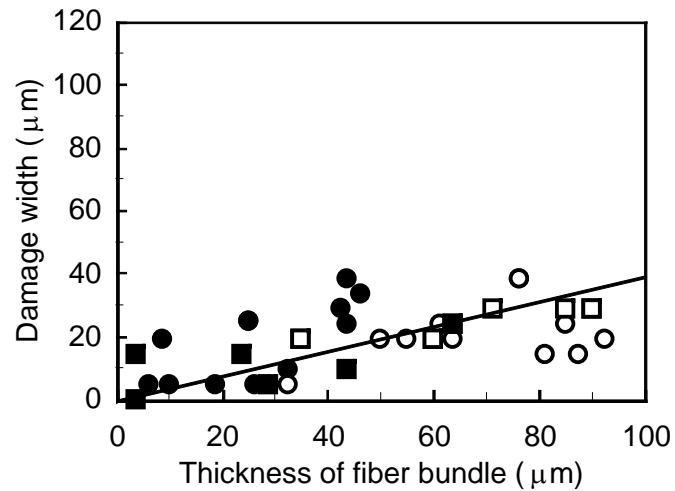
# Definition of thickness of fiber bundle



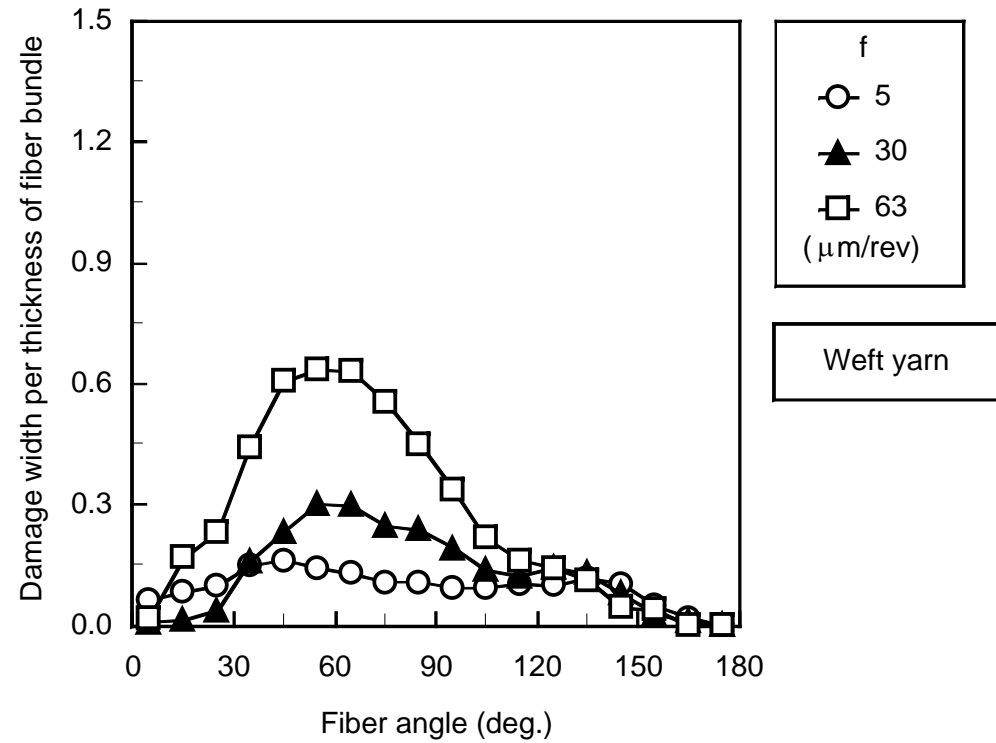
# Relation between damage width and thickness of fiber bundle



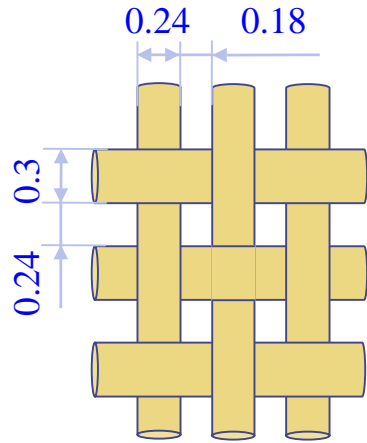
(a)  $\theta=45\text{deg.}$



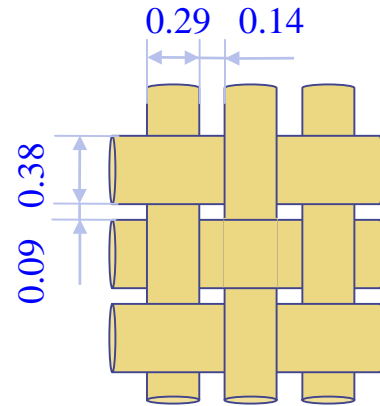
(b)  $\theta=90\text{deg.}$



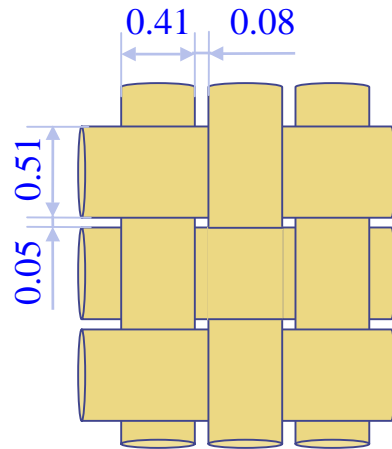
## Dimensions of workpieces



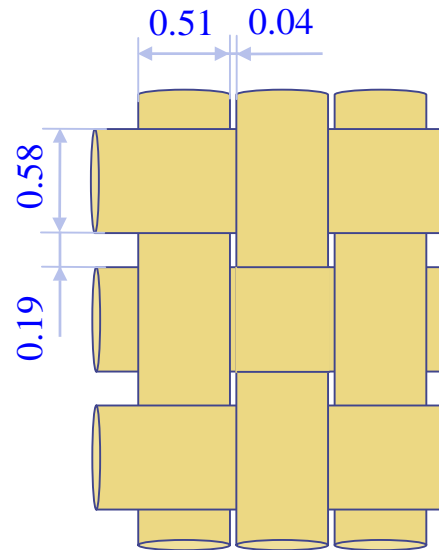
(a)1080(縦糸:35 $\mu$ m, 横糸33 $\mu$ m)



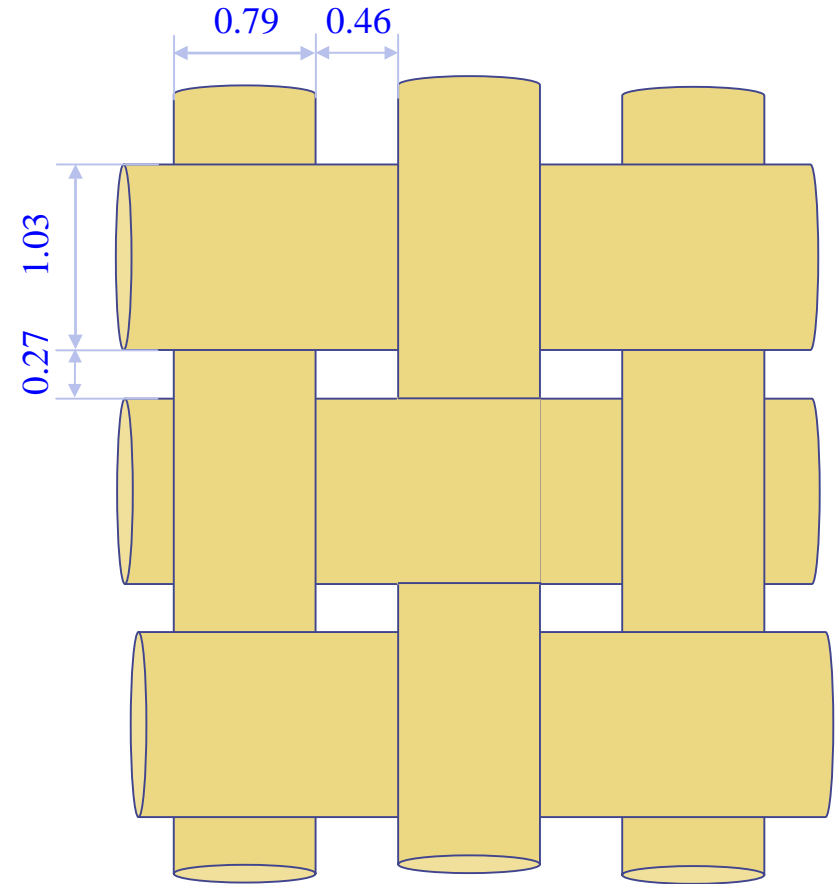
(b)2116(縦糸:68 $\mu$ m, 横糸62 $\mu$ m)



(c)15(縦糸:88 $\mu$ m, 横糸65 $\mu$ m)

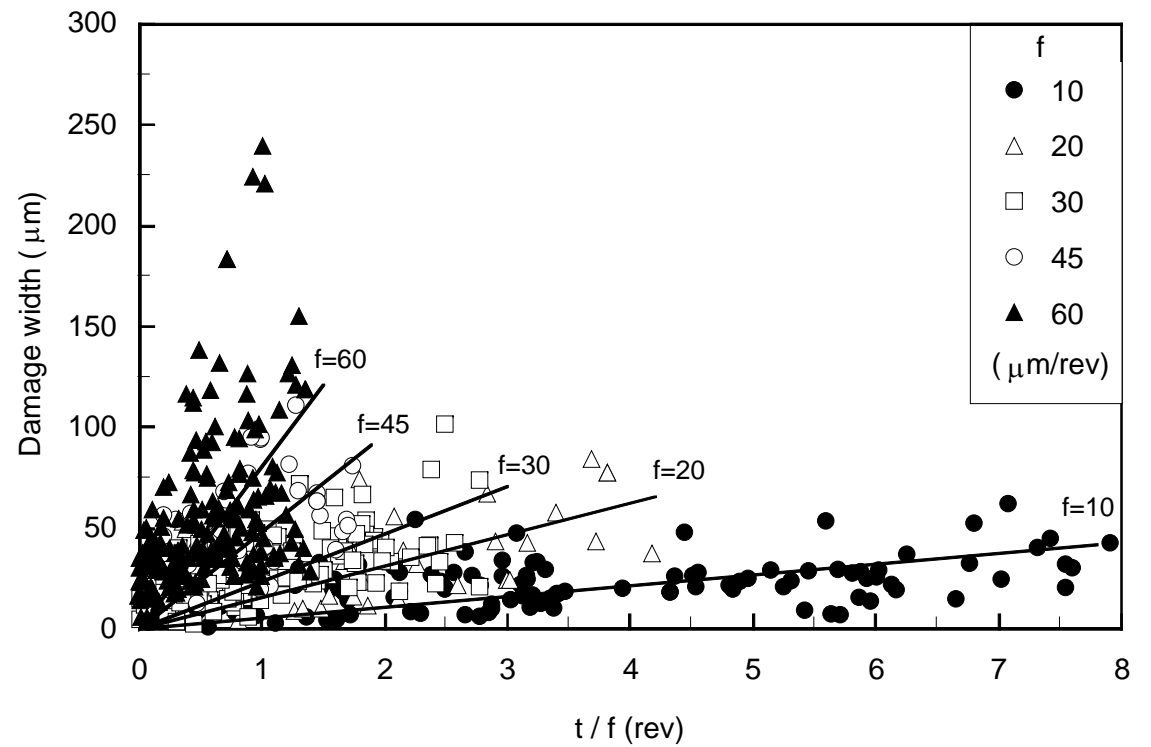
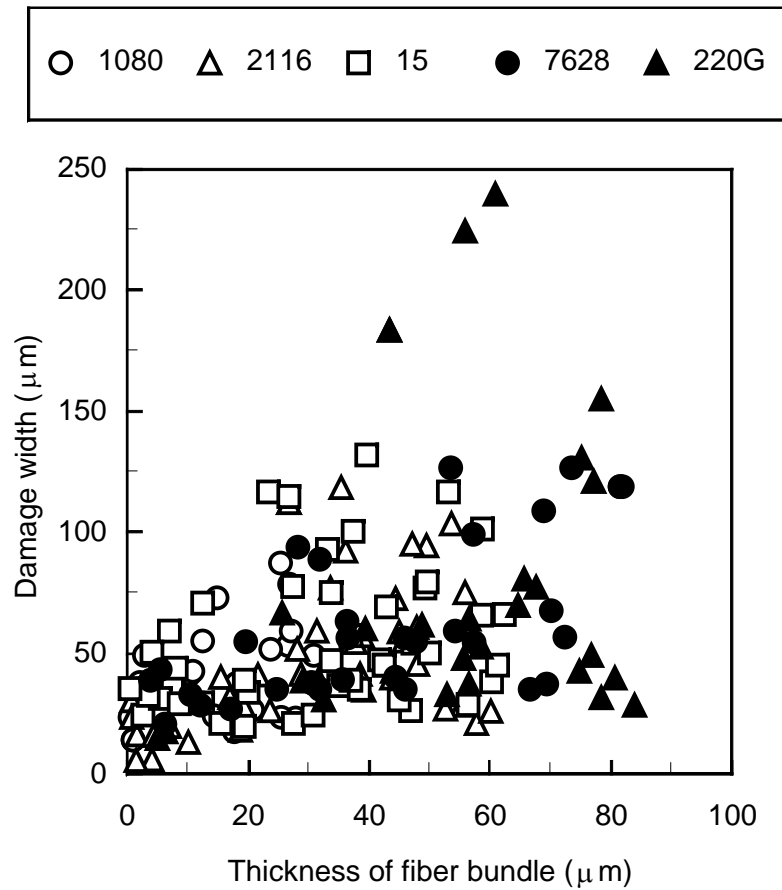


(d)7628(縦糸:93 $\mu$ m, 横糸82 $\mu$ m)

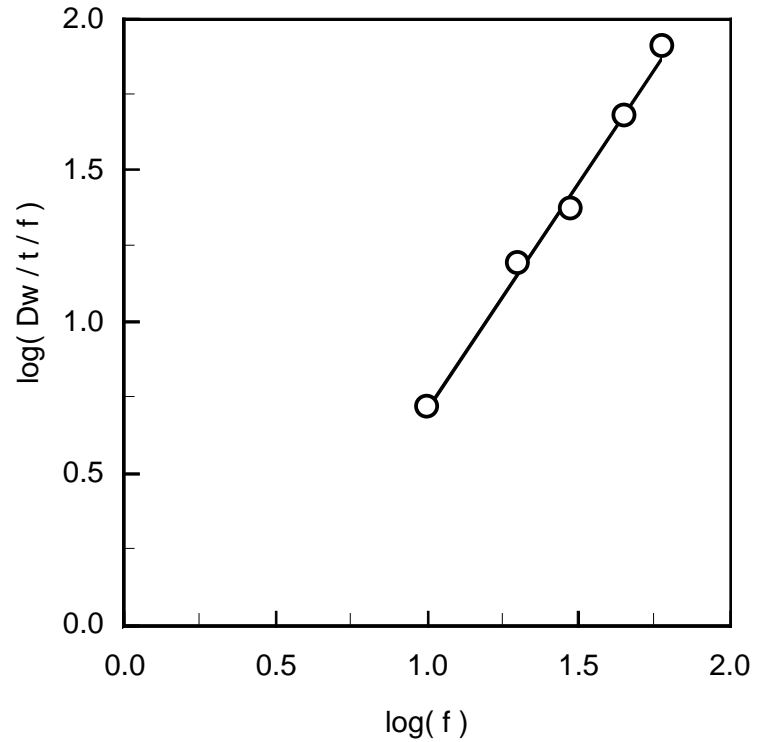


(e)220G(縦糸:122 $\mu$ m, 横糸84 $\mu$ m)

# Relation between damage width and thickness of fiber bundle



## Relation between damage width per revolution and feed rate



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

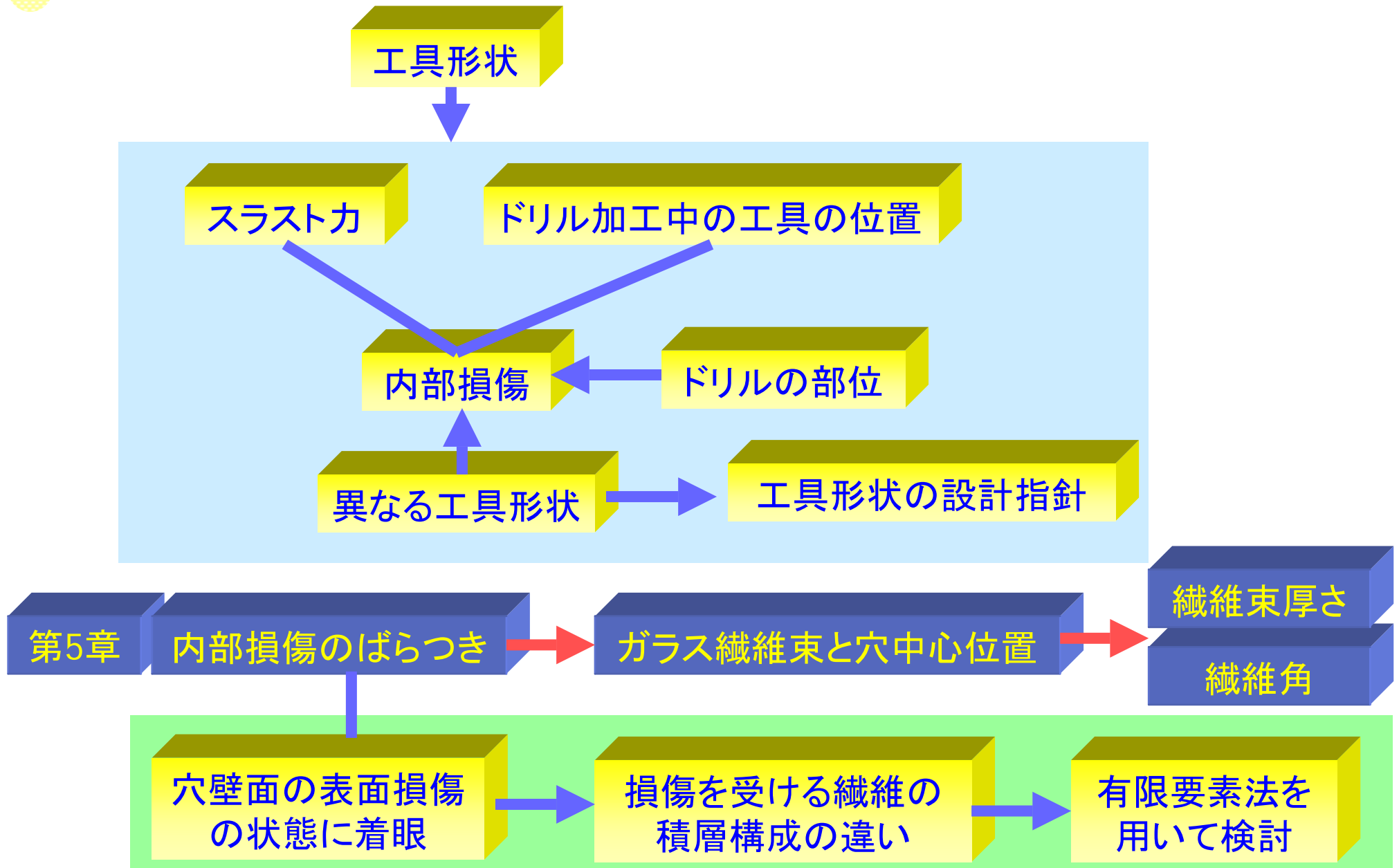
$$\frac{Dw}{t/f} = 0.164 \times f^{1.5}$$

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

## 第5章 結言

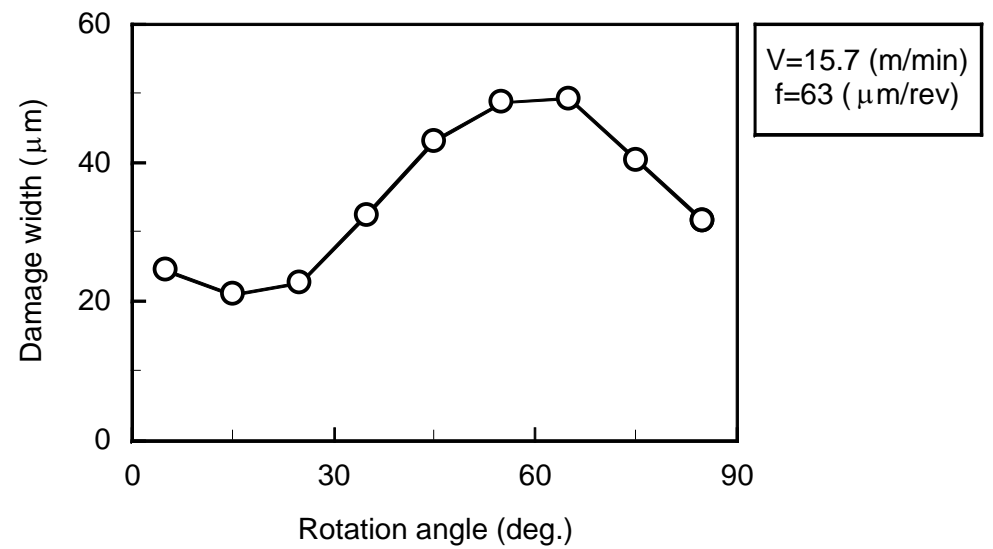
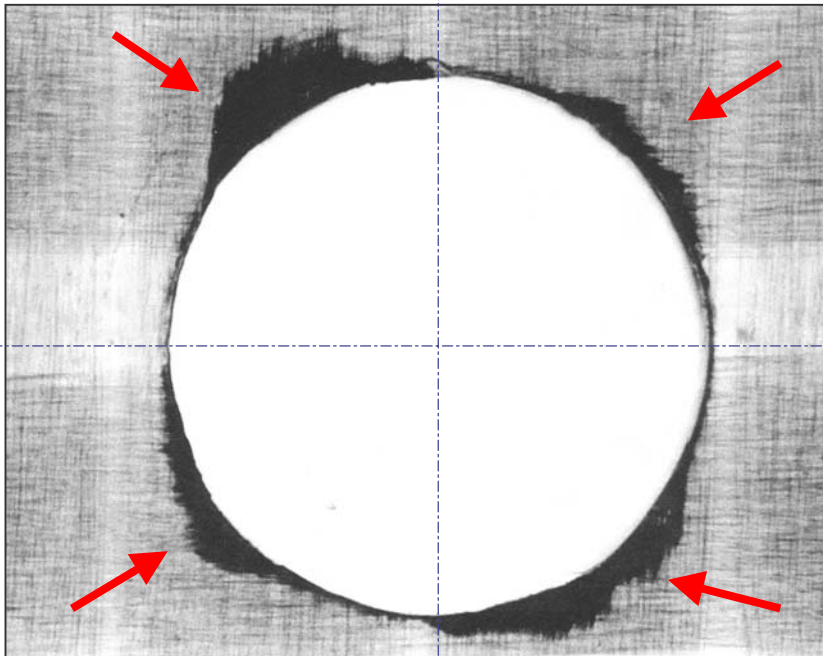
- ◆ 内部損傷はガラスクロスに対する穴中心の**相対位置**により発生形態が異なる。これは繊維角と繊維束厚さが相互に影響しているためである。
- ◆ **繊維束厚さ**が加工穴の内部損傷に影響し、繊維角が同じならば、加工穴壁面の繊維束厚さが増大している箇所では内部損傷が増大する。
- ◆ 加工穴壁面で繊維束厚さが同じならば、繊維角45deg.~60deg.付近で内部損傷は極大値を示し、その傾向は加工時の送り量が大きいほど顕著である。
- ◆ 損傷幅は**繊維束厚さ**に比例し、**送り量の1/2乗**に比例することが分かり、この知見により材料に対する最適な切削条件の設定や、プリント基板に適し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



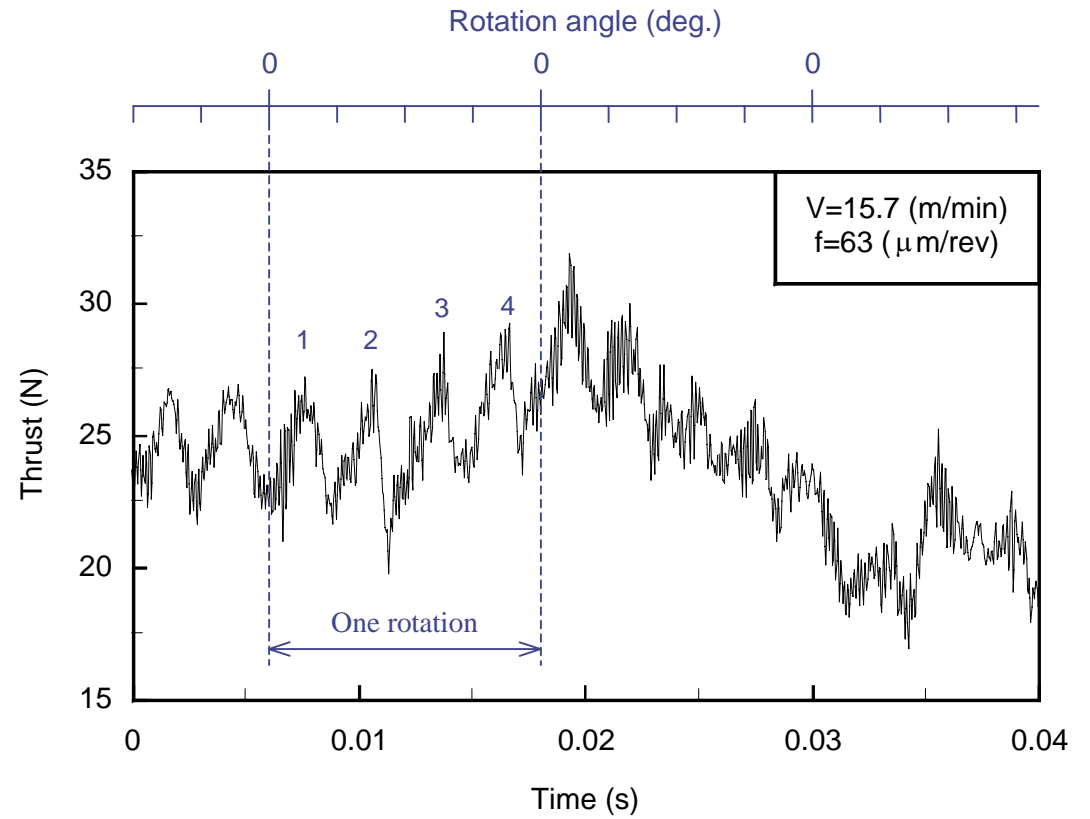
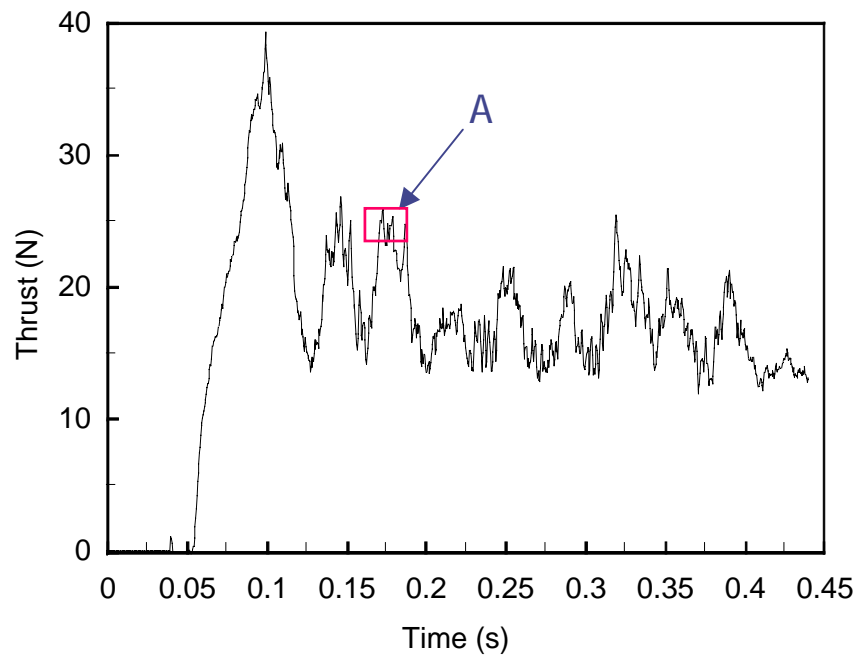


## Micrograph of drilled one ply lamina

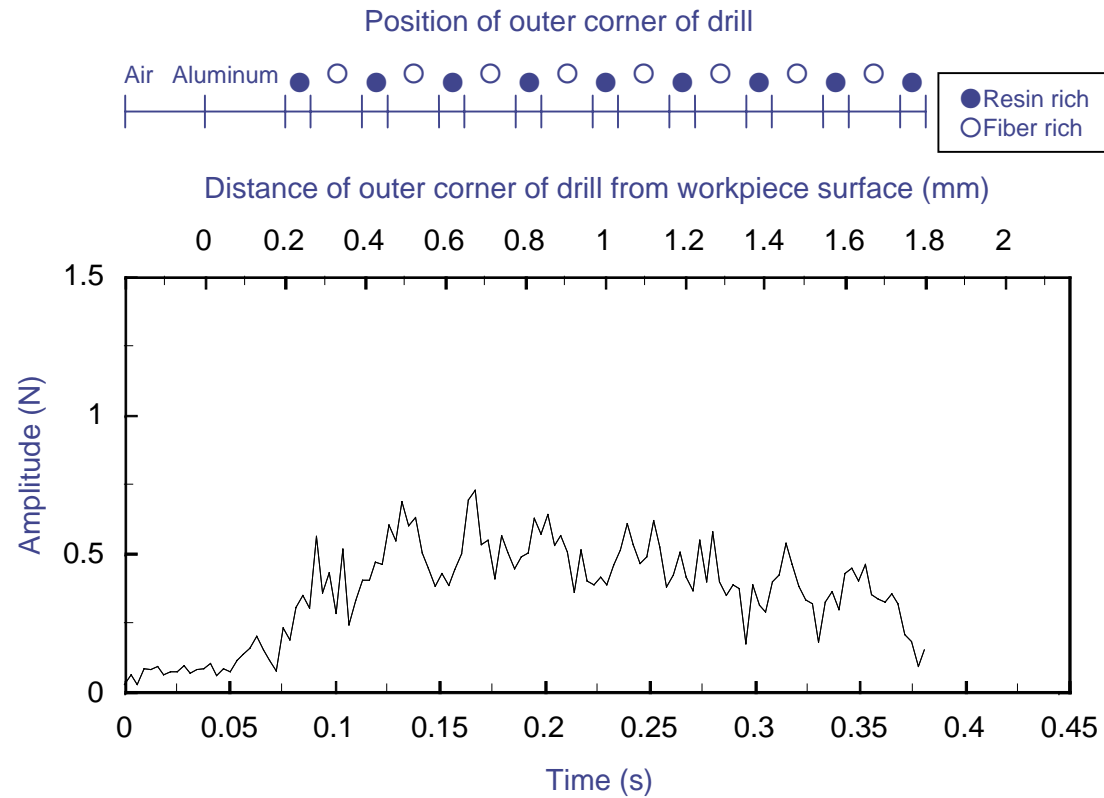


Relation between damage width and rotation angle

# Measured thrust force (definition of 4th harmonic component)

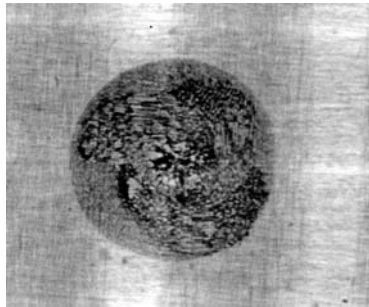


# Amplitude of 4th harmonic component of rotation (TYPE A)

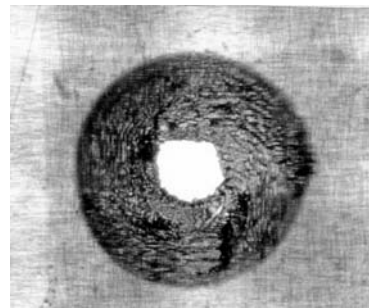
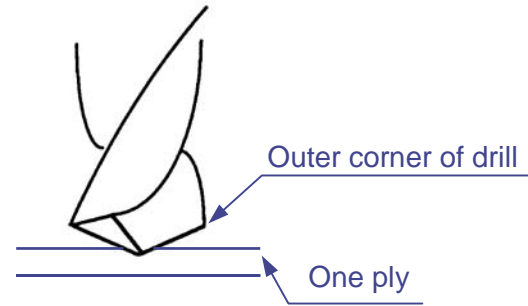


# Micrographs of drilled one ply lamina at halfway in drilling

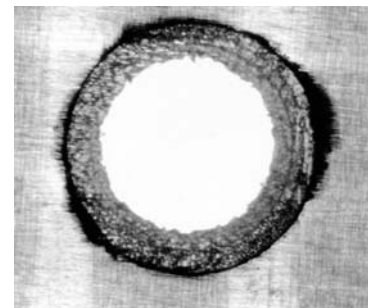
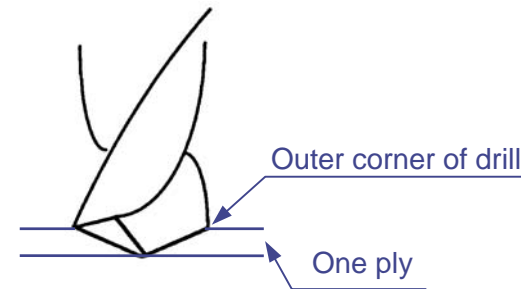
$V=15.7\text{m/min}$   
 $f=63\mu\text{m/rev}$



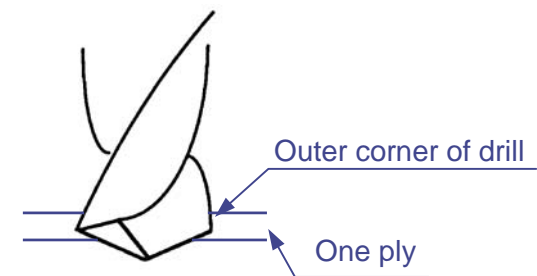
(a)



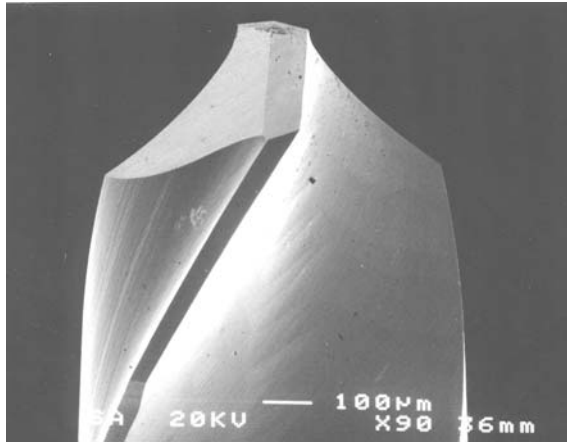
(b)



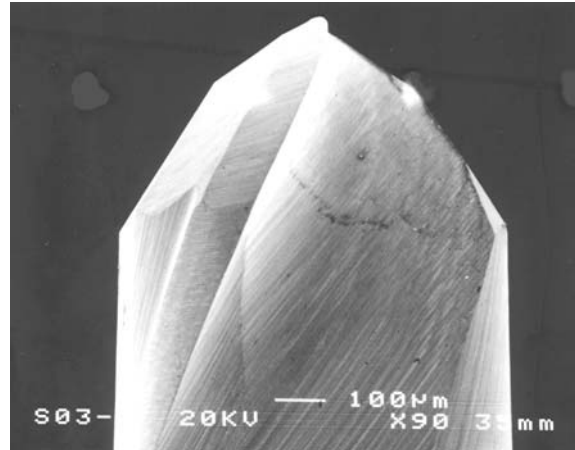
(c)



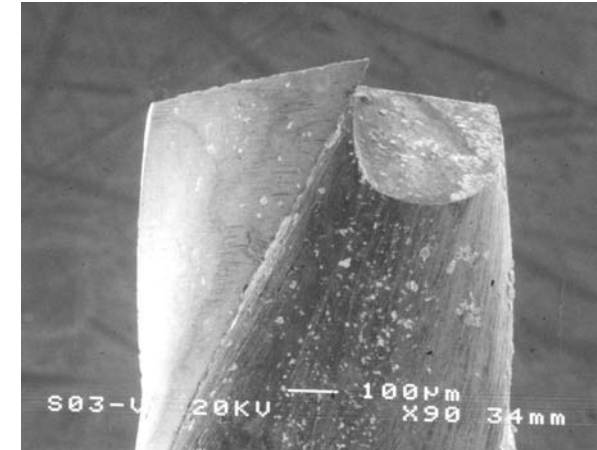
# SEM micrograph of tool



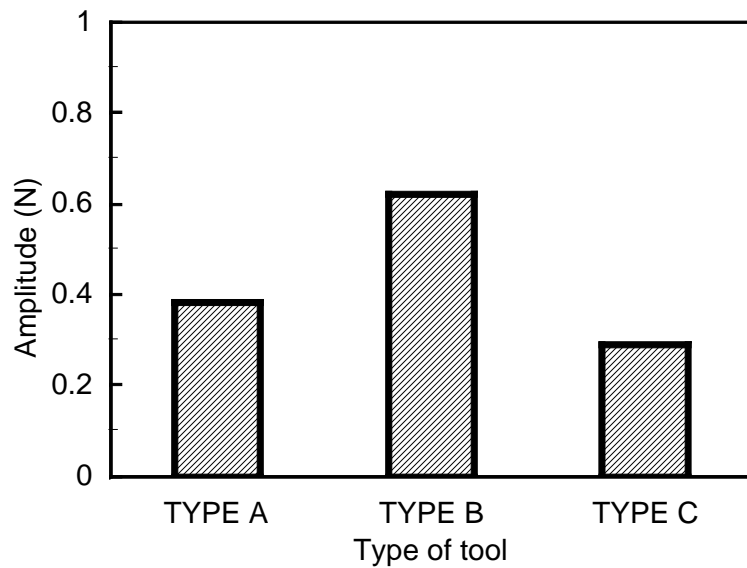
(a) Drill (TYPE A)



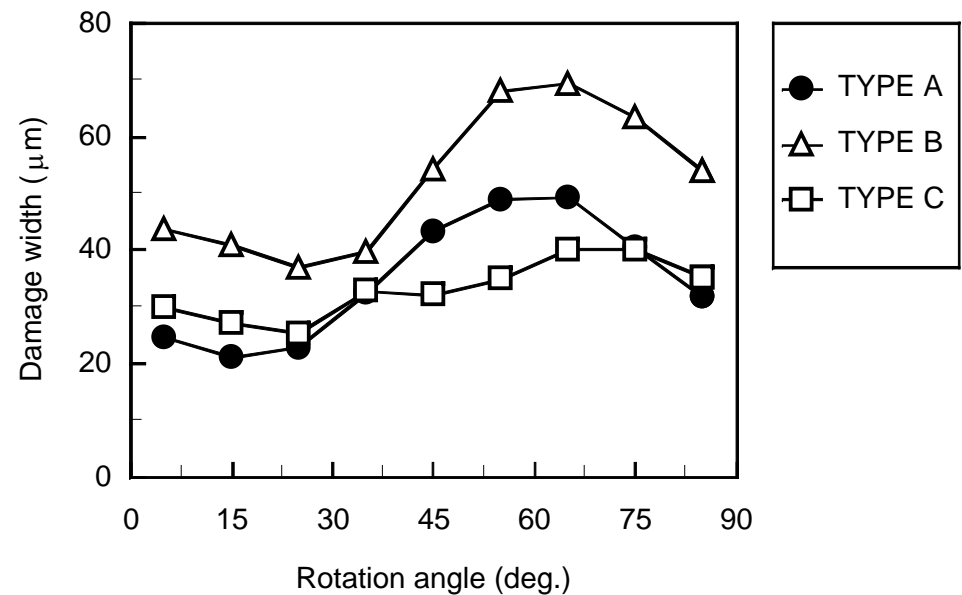
(b) Bowl end mill (TYPE B)



(c) Square end mill (TYPE C)

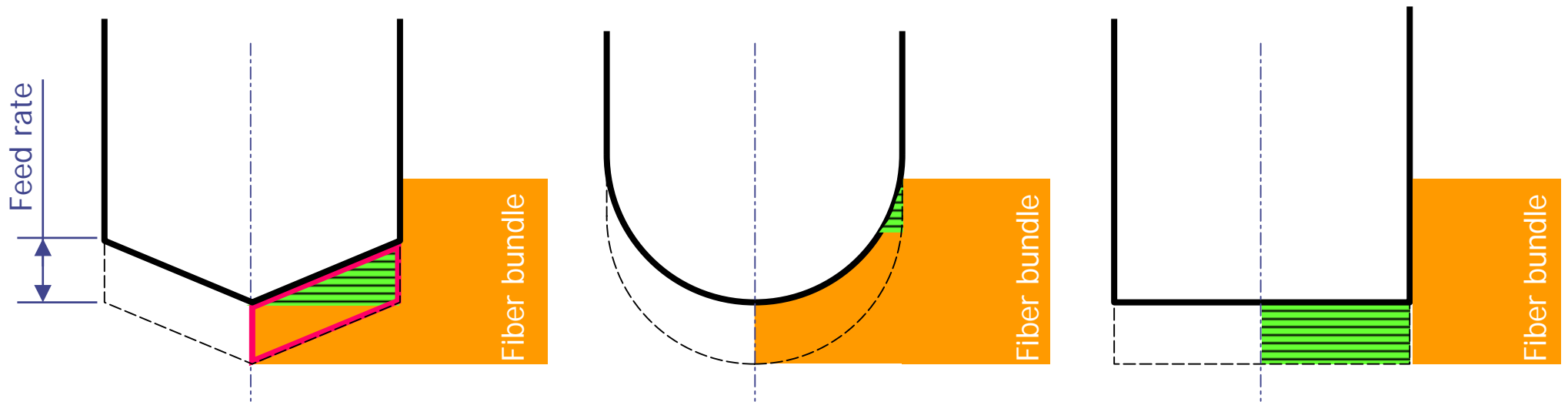


Amplitude of 4th harmonic component of rotation



Damage width and rotation angle

# Drilling process of cutting edge of tool

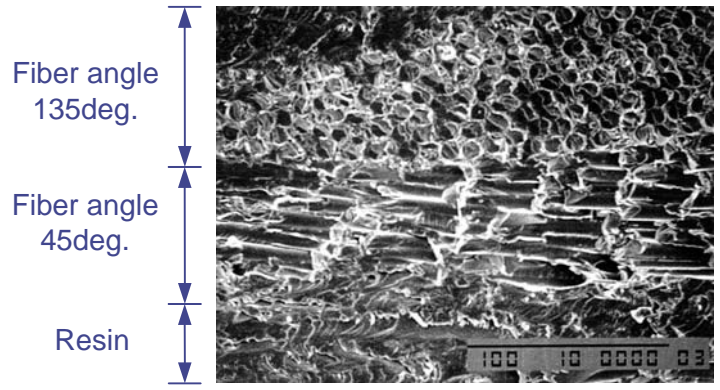
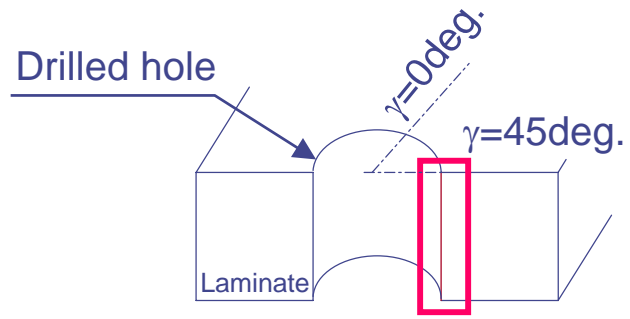
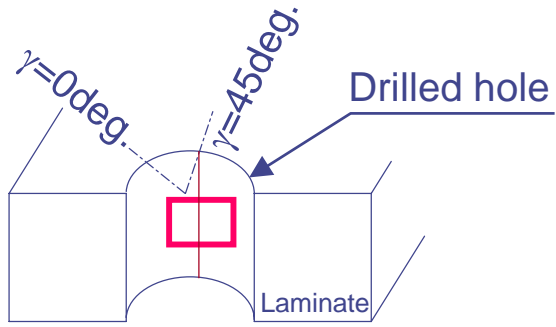


(a) Drill  
(TYPE A)

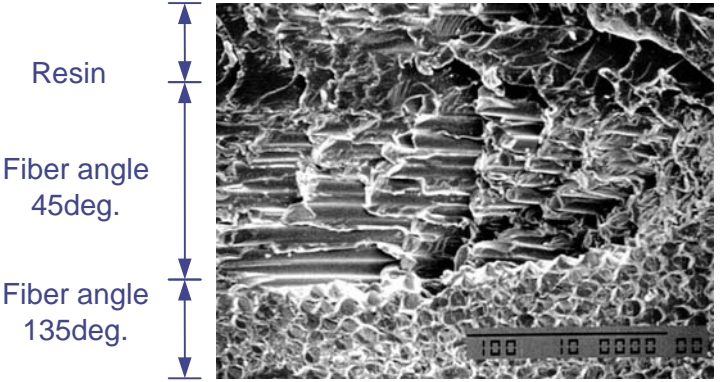
(b) Bowl end mill  
(TYPE B)

(c) Square end mill  
(TYPE C)

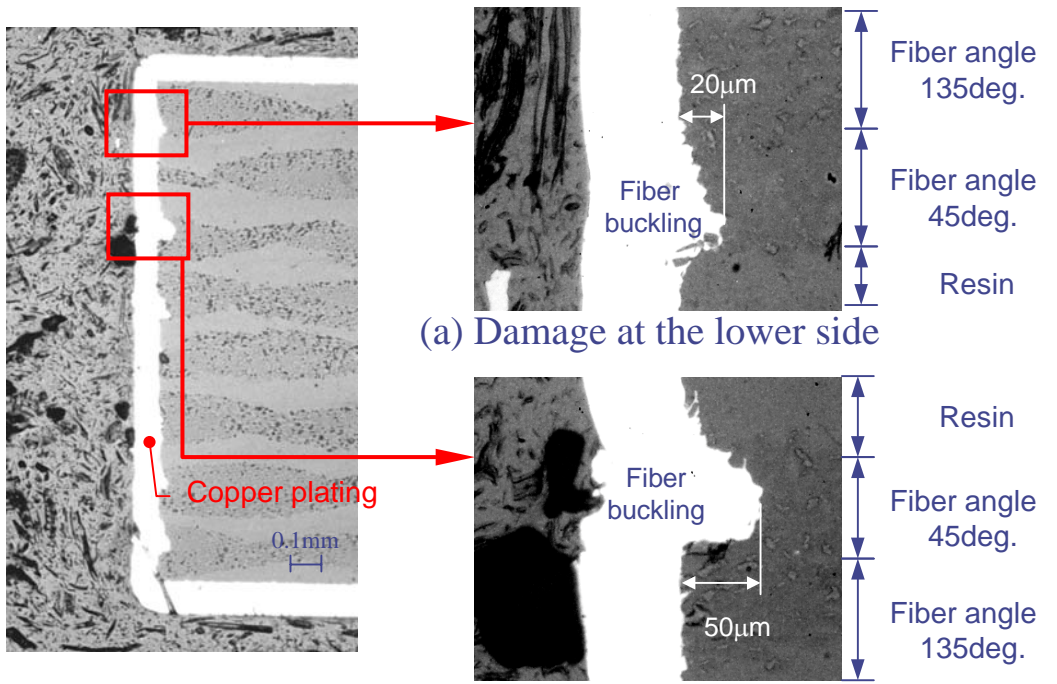
# Micrographs of drilled hole wall



(a) Damage at the lower side



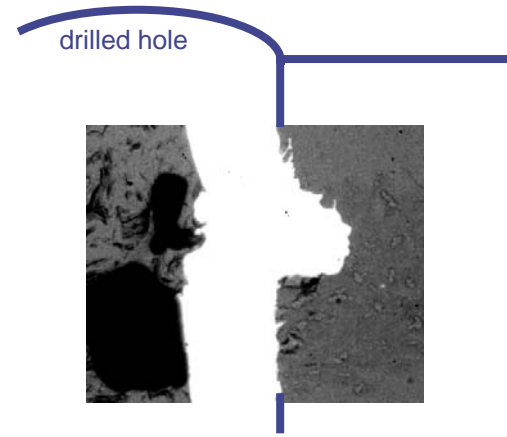
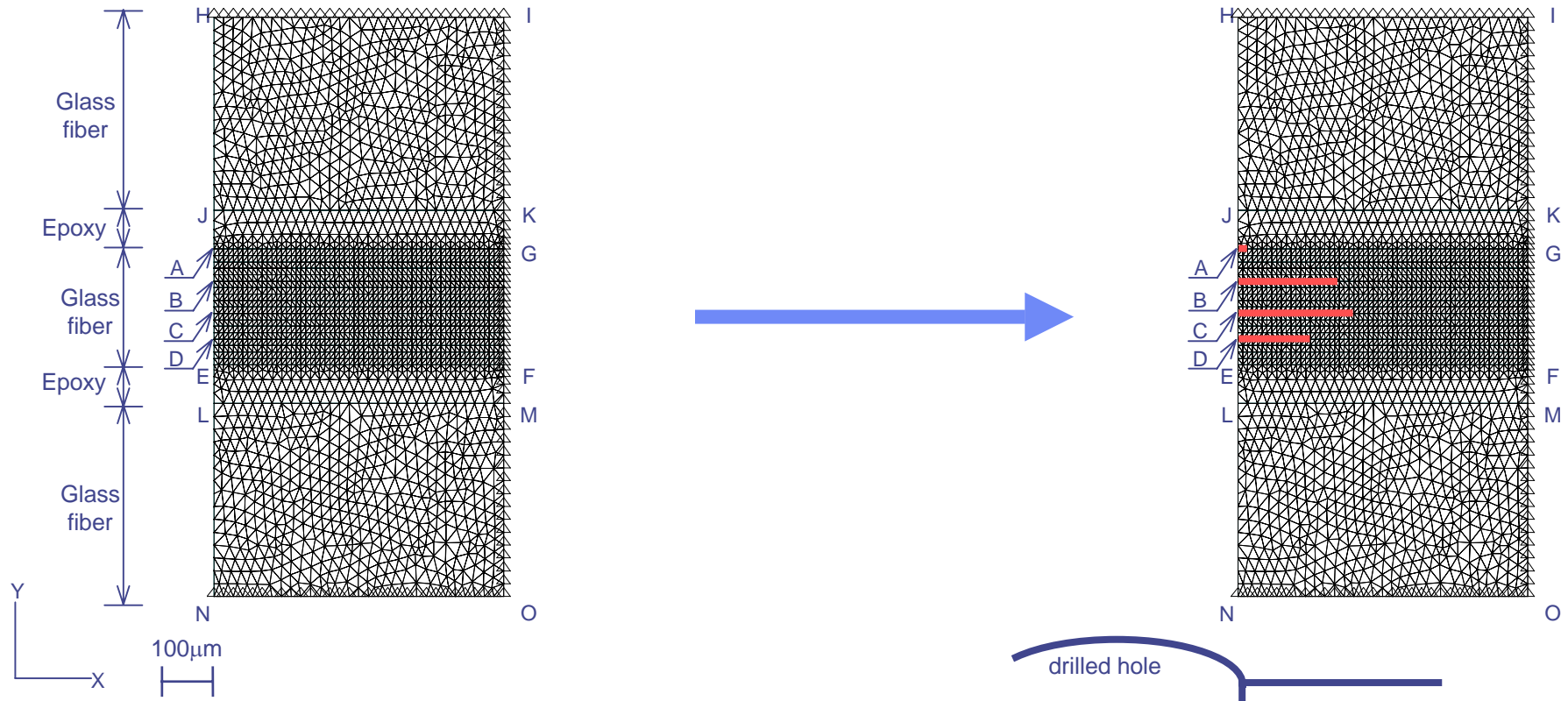
(b) Damage at the upper side



(a) Damage at the lower side

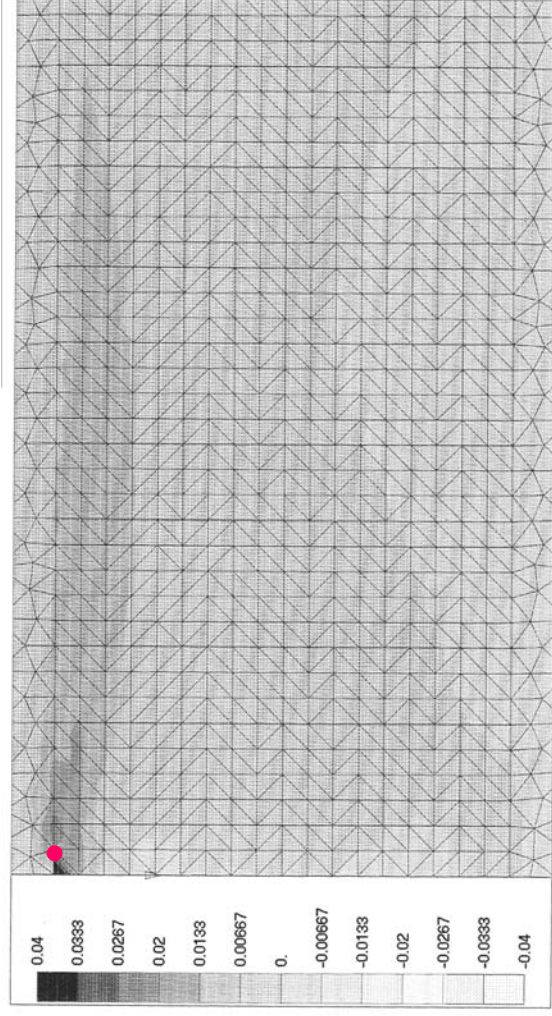
(b) Damage at the upper side

# Finite element method

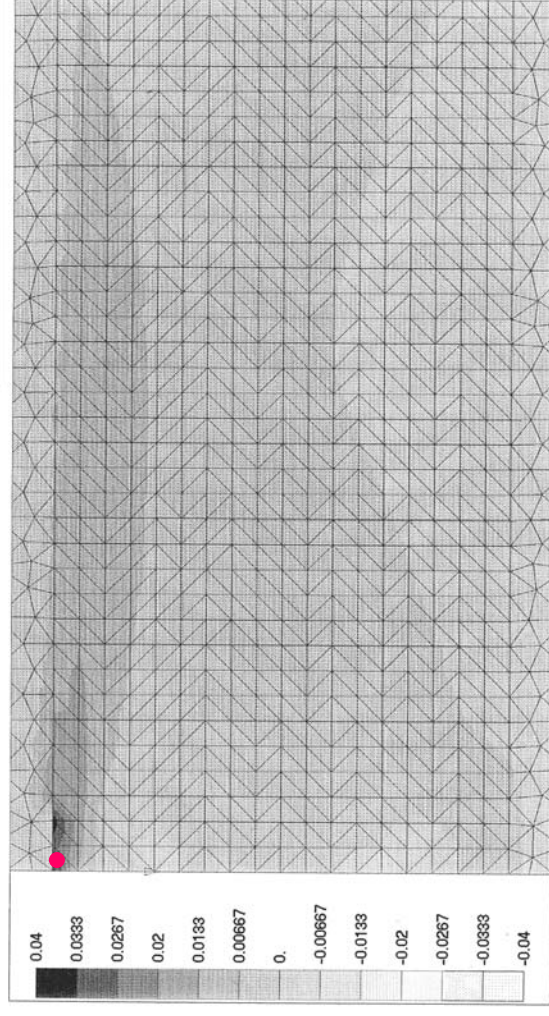




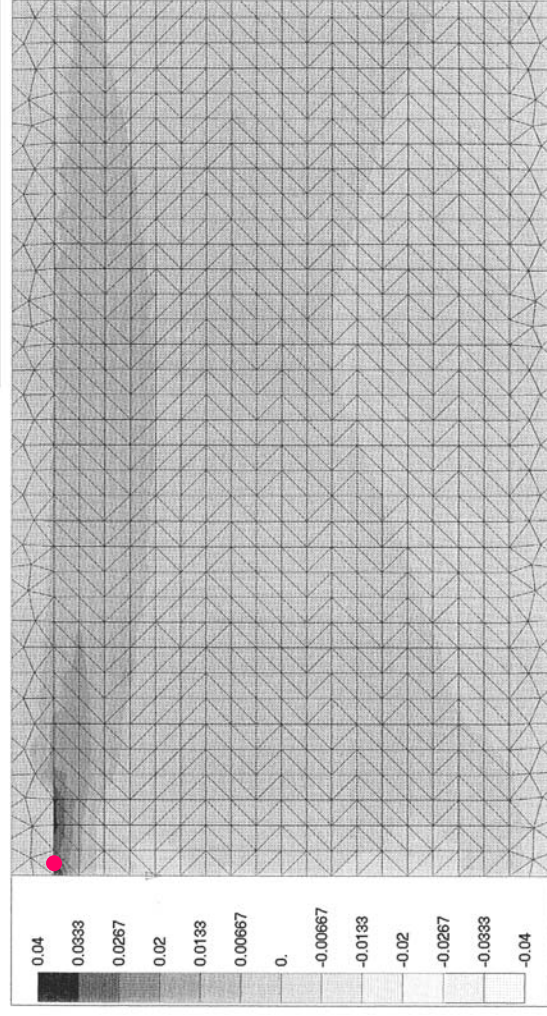
# Calculated major stress (Loaded position : A)



(a) Progress fracture : 1 steps



(b) Progress fracture : 3 steps



(c) Progress fracture : 4 steps

## 第6章 結言

- ◆ クロス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.
- ◆ 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り, 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.
- ◆ 異なる形状の工具で穴あけ加工を行った結果, 回転4次成分及び内部損傷は工具の肩部形状に影響されることが分かった.
- ◆ 加工中の工具と繊維との関係から, 切削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.
- ◆ 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.

## 第7章 工具摩耗と加工穴品質の変化

前章までは、加工回数初期段階までの加工穴品質を評価

実際のプリント基板の生産では、膨大な数のドリル加工

工具摩耗による加工穴品質の変化

加工条件

スラスト力

内部損傷

ダイヤモンドコートドリル

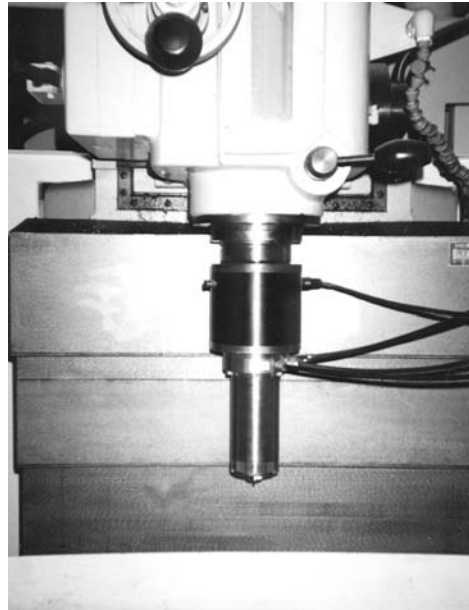
コート無ドリル

加工穴品質

# Experimental method, cutting condition and wear width



(a) NC milling machine

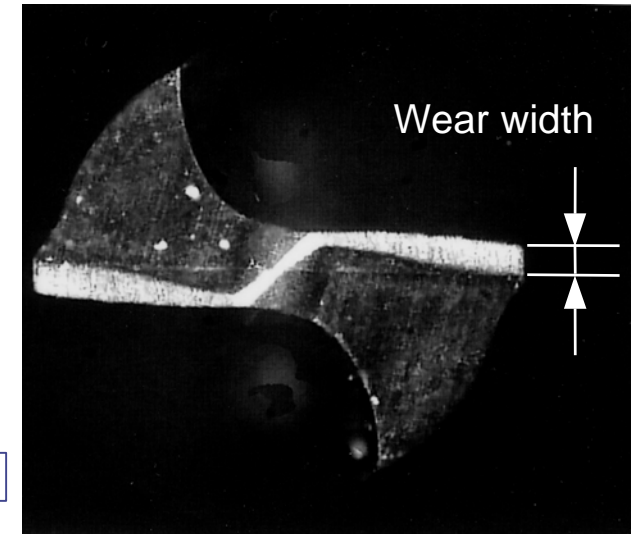


(b) Air spindle motor

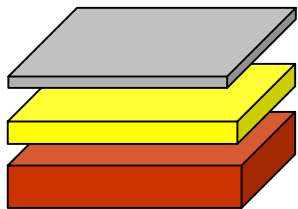
Diameter	Spindle speed	Cutting speed	Feed speed	Feed rate
D mm	N rpm	V m/min	F mm/min	f $\mu\text{m/rev}$
1.0	33,000	103.6	170	5
			1,000	30
			2,000	60

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

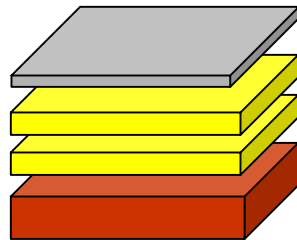
$$f = \frac{F}{N} \times 10^3$$



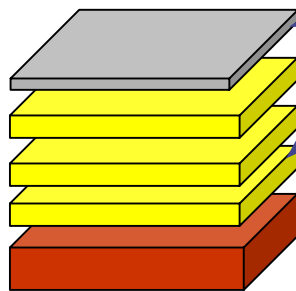
Drill	Cemented carbide drill	WC drill
	Diamond coated drill	Coated drill



(a) 1 plate



(b) 2 plates



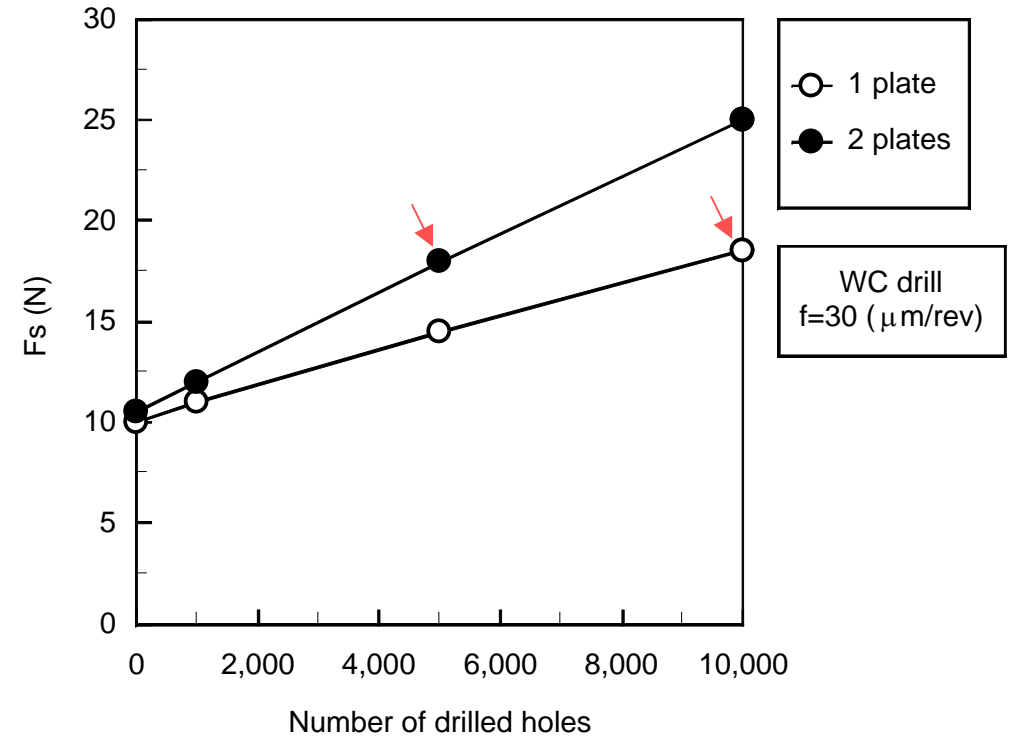
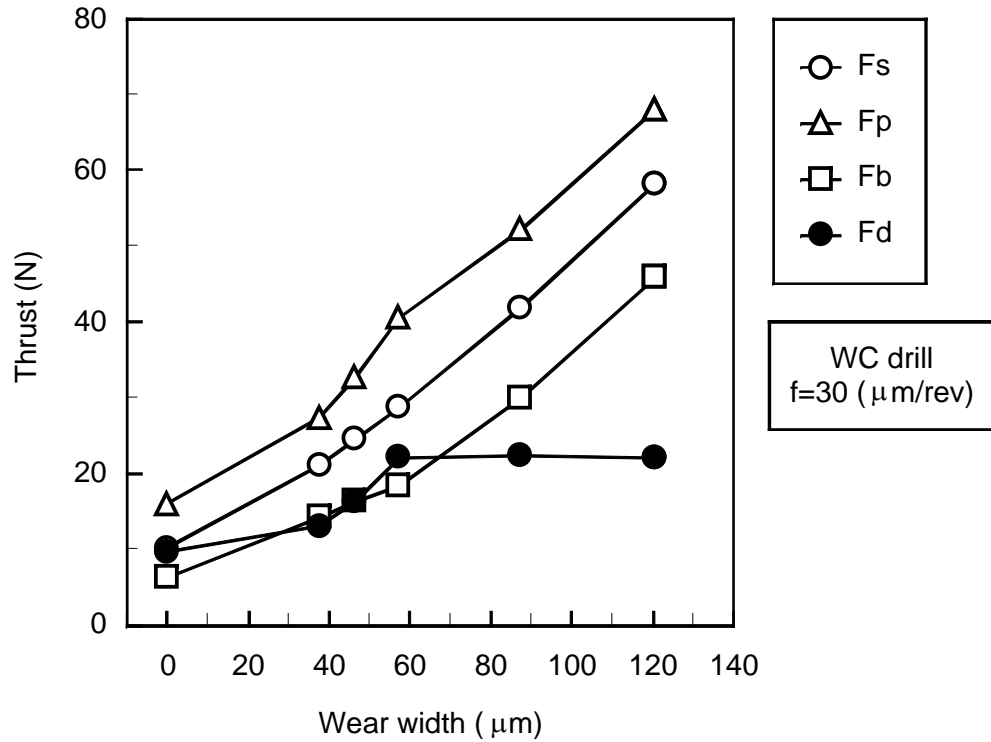
(c) 3 plates

Top stiffening plate (aluminum)

Printed wiring board

Bottom stiffening plate (bakelite)

## Relation between thrust force and wear width



Fs 静的成分

Fd 動的成分

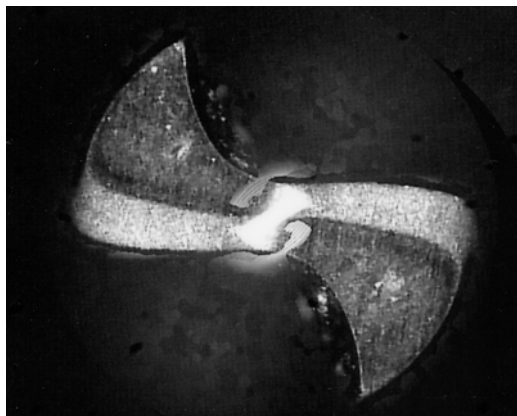
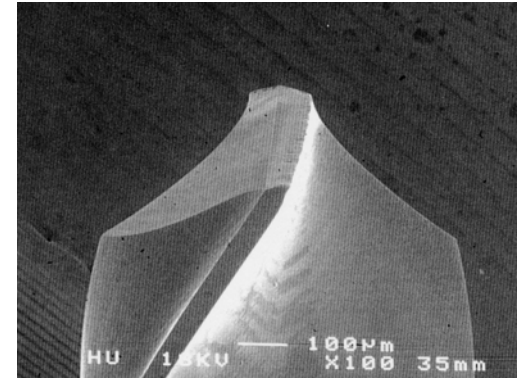
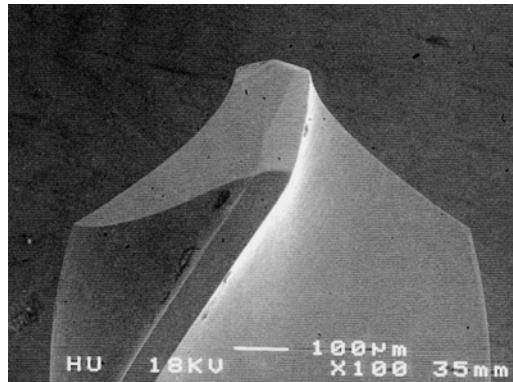
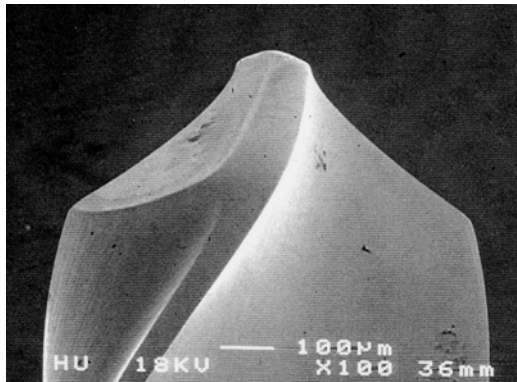
Fp 最大值

Fb 最小值

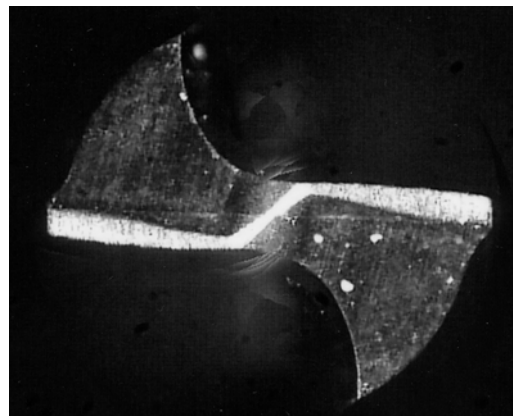
$$F_s = \frac{F_p + F_b}{2}$$

$$F_d = F_p - F_b$$

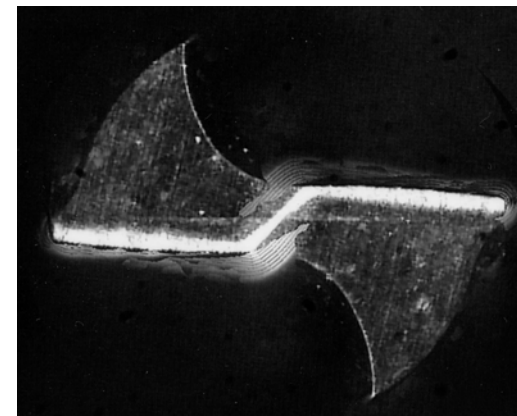
*SEM micrographs of drill (10,000 holes)*



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

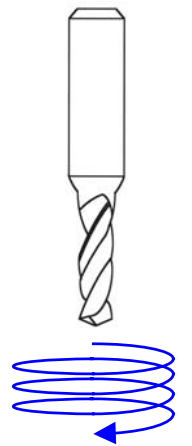
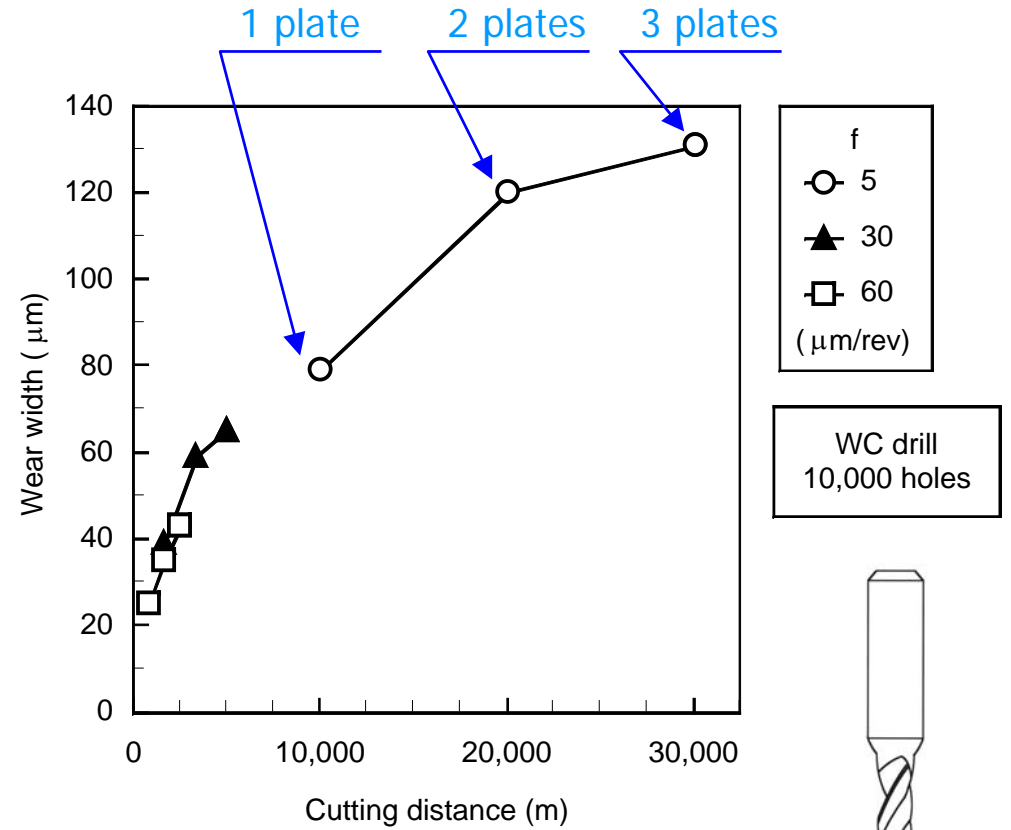
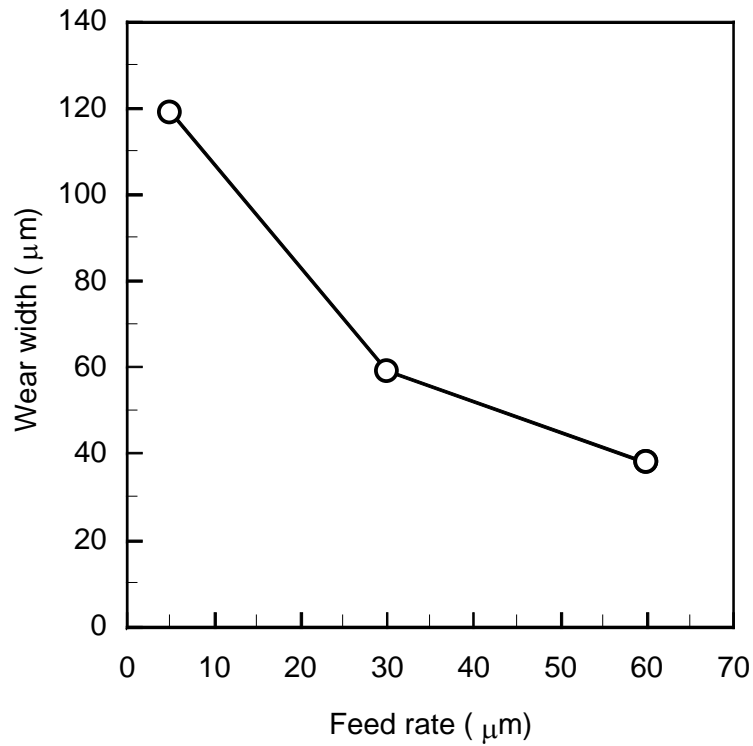


(b)  $f=30\mu\text{m}/\text{rev}$

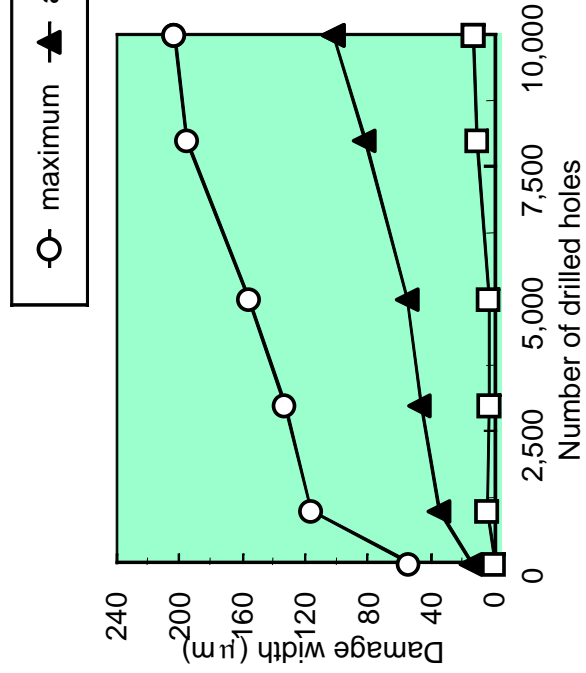
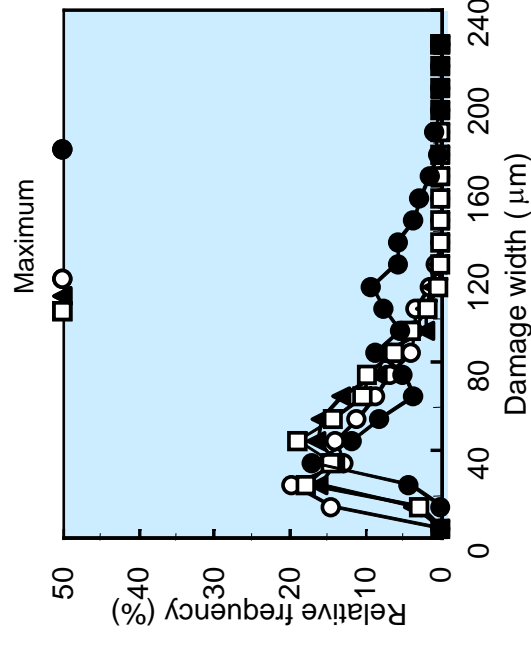
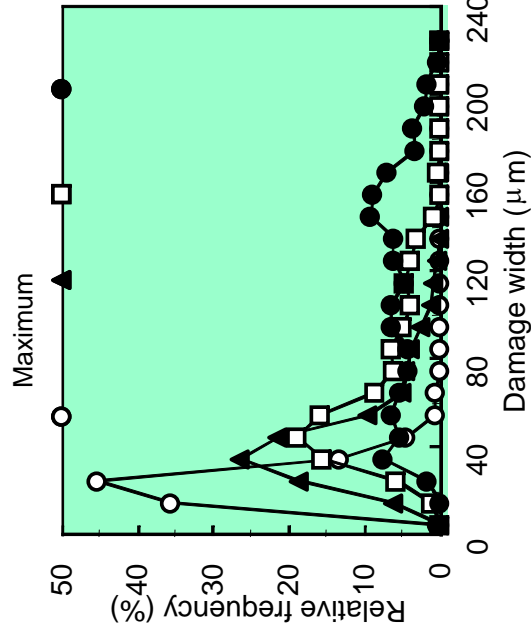
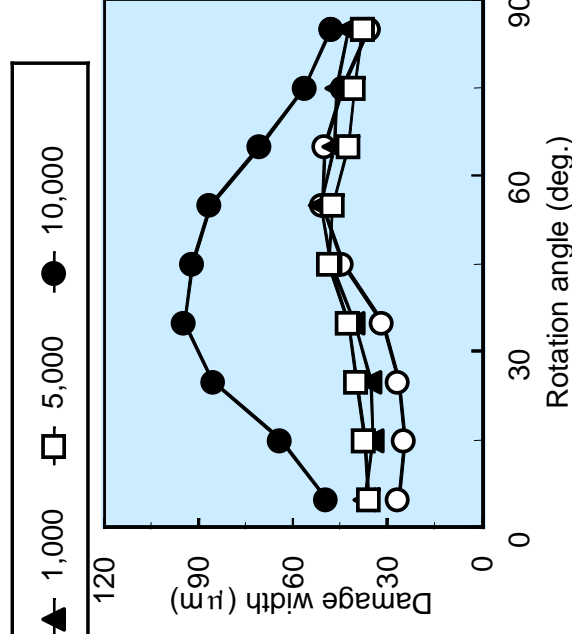
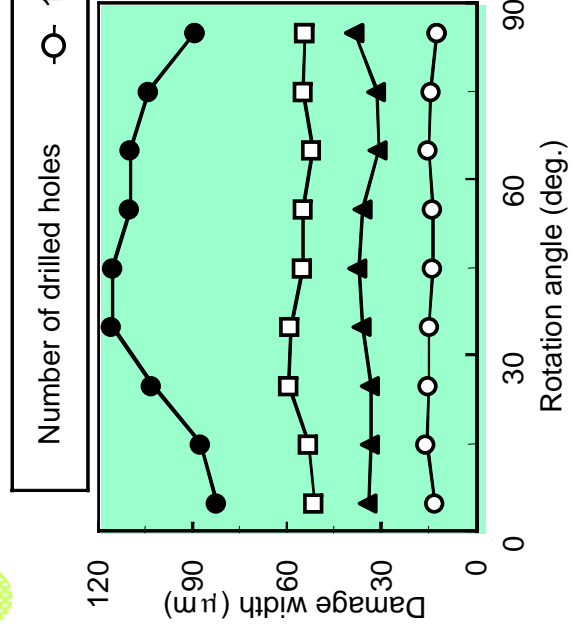


(c)  $f=60\mu\text{m}/\text{rev}$

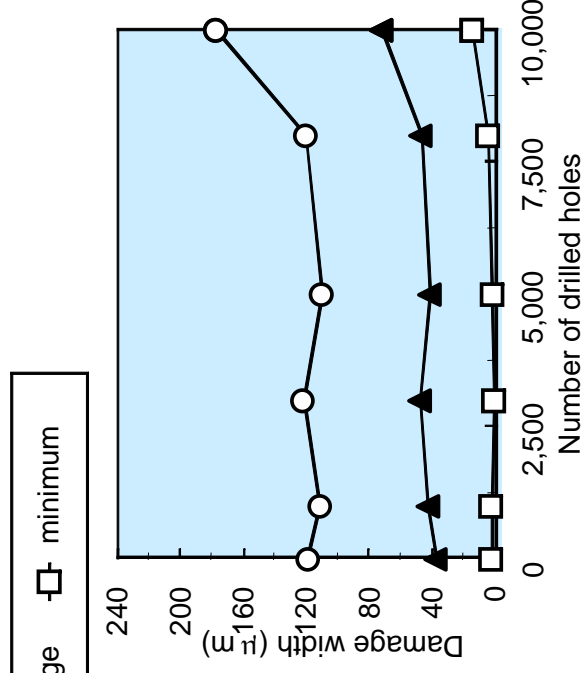
# Relation between wear width and cutting condition



# Damage width



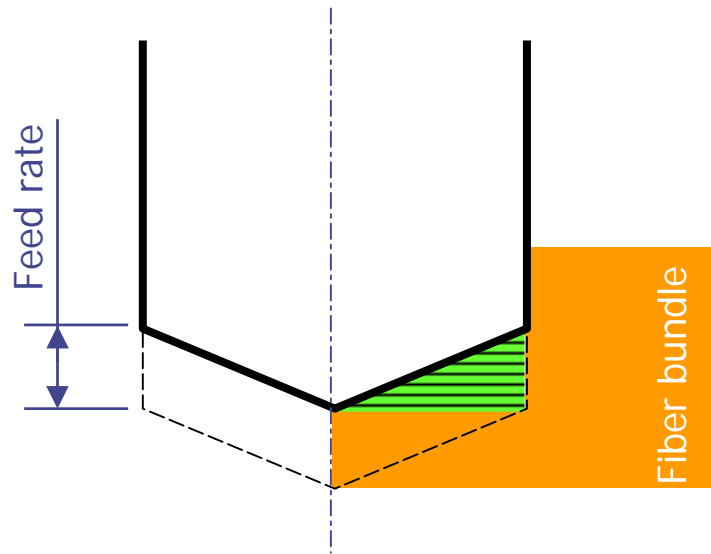
(a)  $f = 5\mu\text{m/rev}$



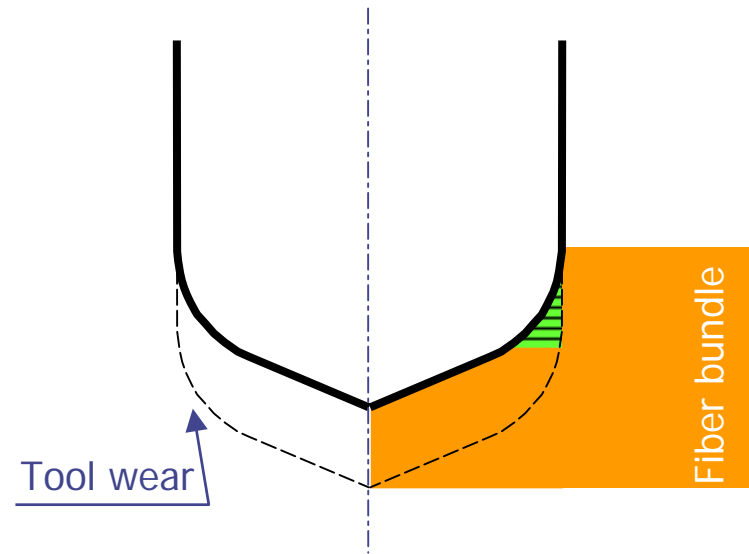
(b)  $f = 60\mu\text{m/rev}$



## *Drilling process of cutting edge*

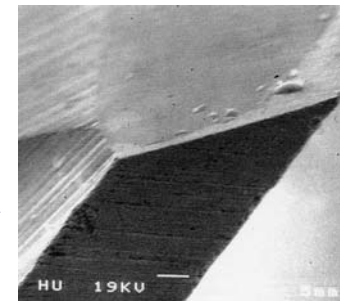
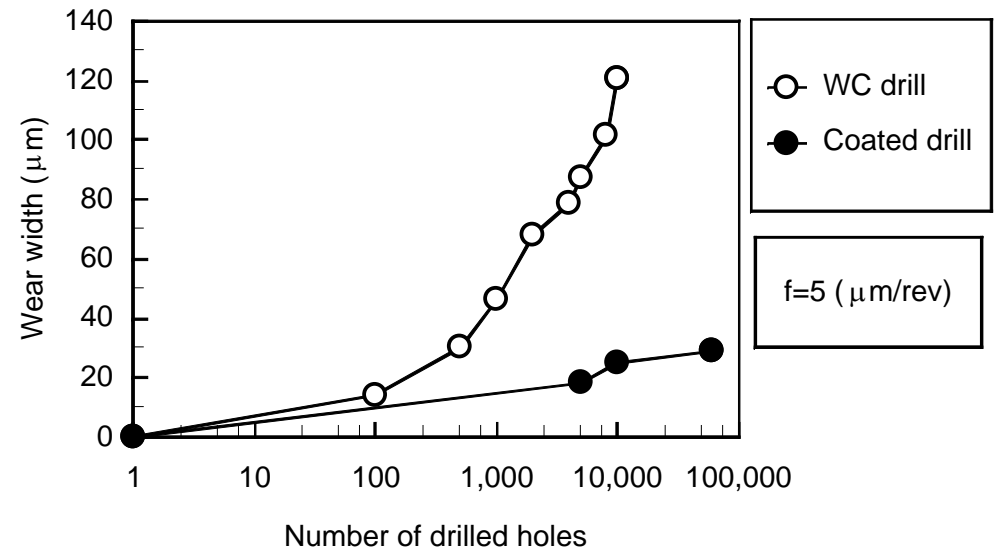
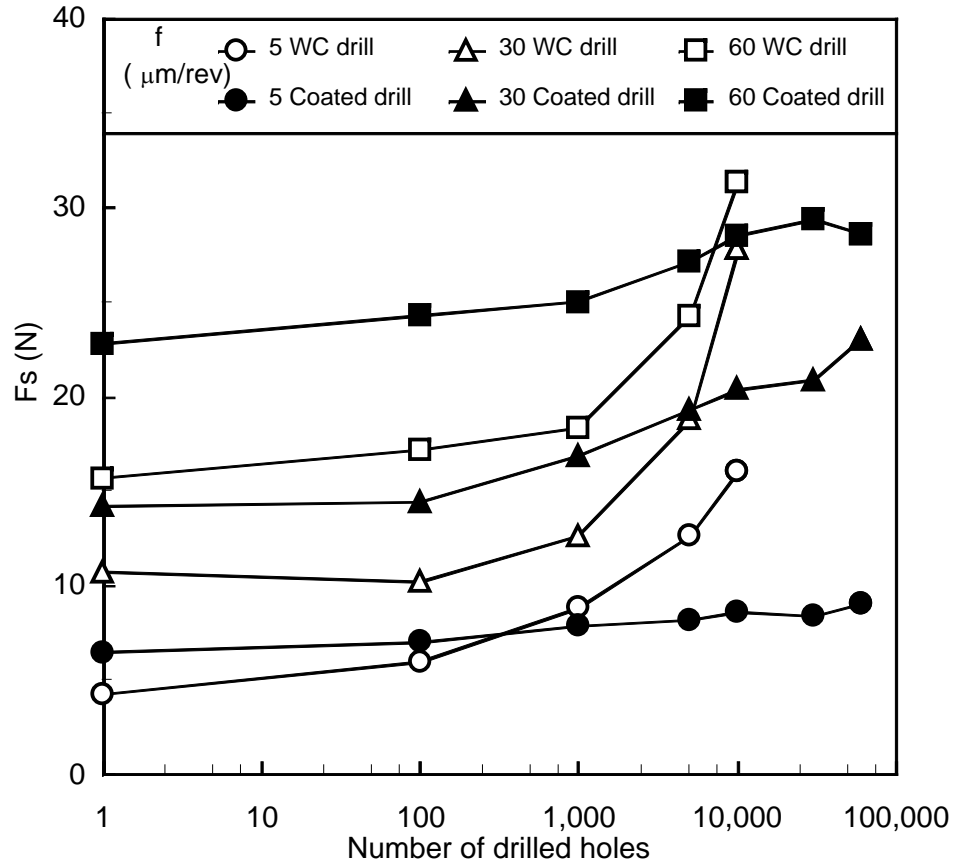


(a) Without wear (virgin tool)

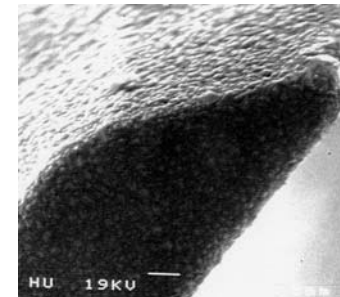


(b) With wear (worn tool)

# Thrust force ( $F_s$ ) and wear width

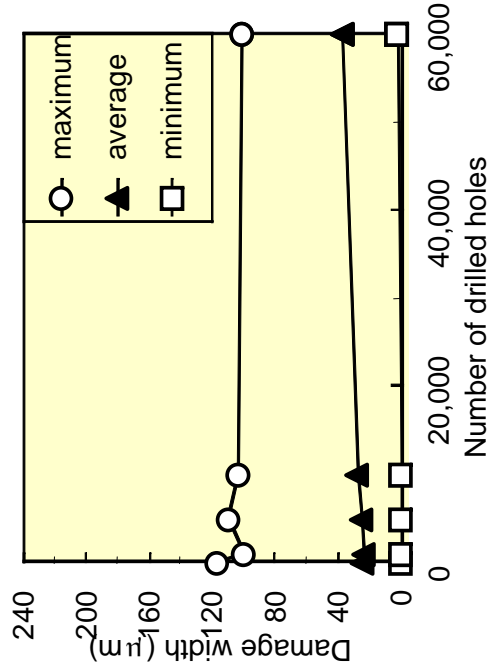
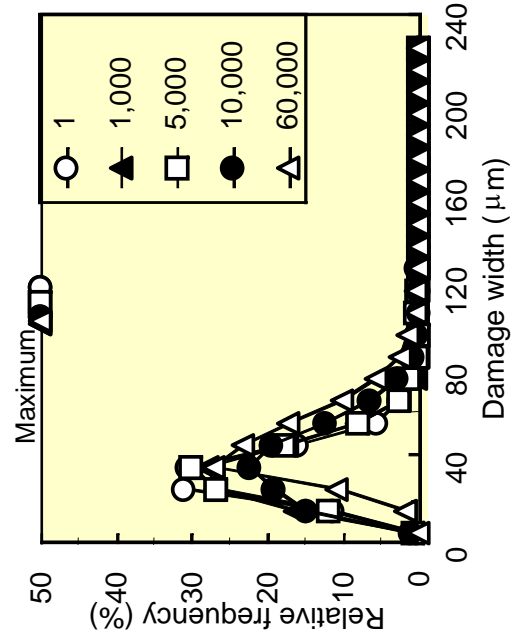
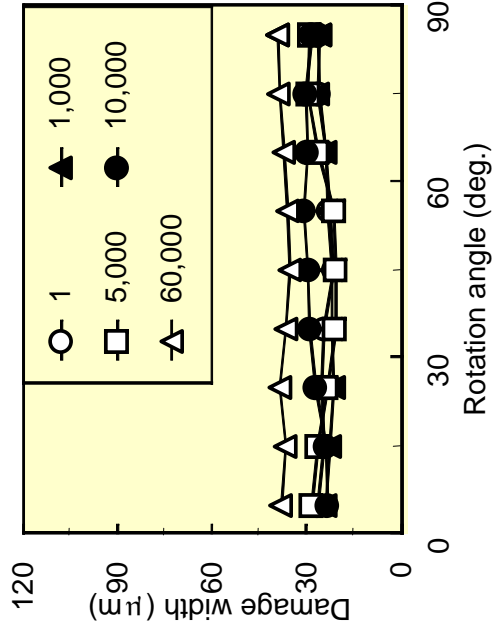


(a) Outer corner of WC drill

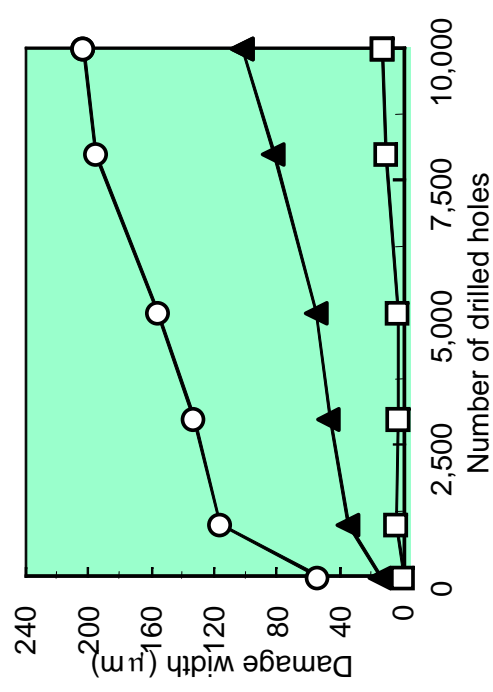
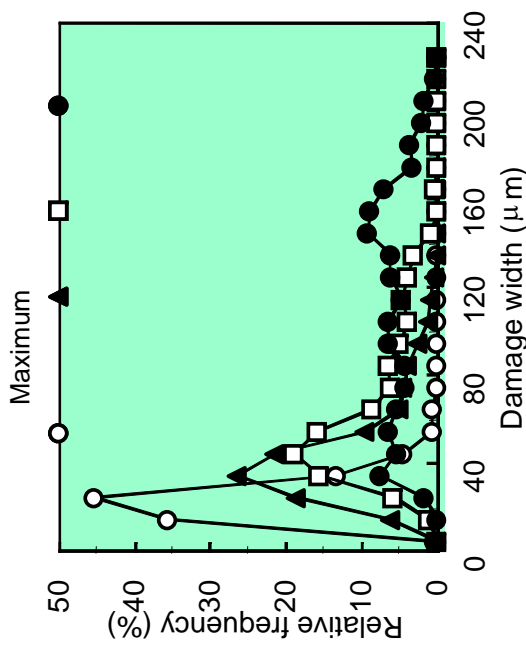
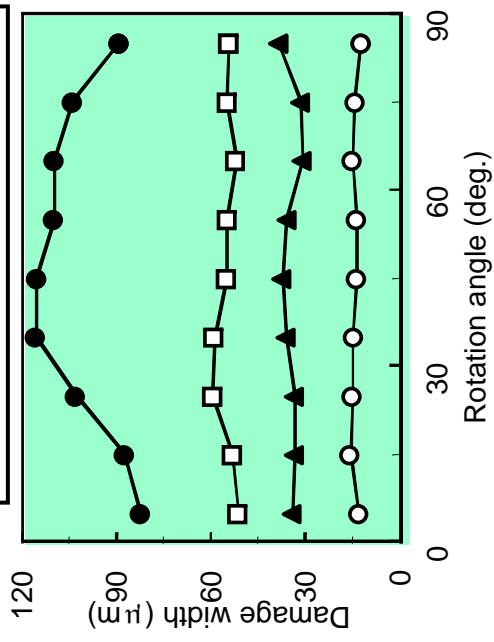


(b) Outer corner of coated drill

# Damage width (Coated drill, $f=5\mu\text{m}/\text{rev}$ )



(a) Coated drill



(b) WC drill

## 第7章 結言

- ◆ 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。
- ◆ 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。
- ◆ 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。
- ◆ 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、コート膜による刃先の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しドリルと比べ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にわたり維持することが分かった。

## 第8章 結論(1)

第2章

プリント基板小径スルーホールの内部損傷を評価するための画像処理システムを構築

定量的

迅速

統計的

第3章

表面損傷の詳細データ

ガラス繊維の掘り起し

最大表面粗さ $R_{max}$

回転角30deg.付近  
繊維角30deg.の繊維  
のみに発生

送り量

スラスト力動的成分 $F_d$

表面損傷と内部損傷を比較

第4章

内部損傷の詳細データ

内部損傷

損傷幅

送り量

回転角30deg.付近から発生  
回転角60deg.付近で最大  
繊維角45deg.方向に進行

ばらつき

## 第8章 結論(2)

### 第5章

内部損傷がばらつく原因について検討

ガラス繊維束とドリル中心位置との関係

切削部の繊維束厚さ

繊維角

繊維束厚さの異なる材料をドリル加工

内部損傷

送り量

繊維束厚さ

### 第6章

工具の内部損傷への影響

内部損傷

ドリル肩部

異なる形状の  
工具で穴あけ  
加工

切削  
繊維

工具  
設計指針

スラスト力

回転4次成分

### 第7章

工具摩耗と加工穴品質の関係

工具摩耗

切削距離

内部損傷

工具形状の変化

切削繊維

ダイヤモンド  
コートドリル

加工回数初期段階では  
コート無ドリルに比べ悪化

加工回数の増加  
初期の加工穴品質を維持