

ステンレス鋼の微細ドリル加工特性 —加工条件および結晶粒径が工具摩耗に及ぼす影響—

Machinability of Stainless Steel in Micro-Drilling — Influence of Cutting Condition and Crystal Grain Size on Tool Wear —

藤原 久一* 大山 博*
Hisakazu Fujiwara Hiroshi Ohyama

(2001年7月23日 受理)

An investigation of tool wear has been carried out to clarify the machinability of austenite stainless steel(SUS304)in micro drilling. An influence of feed rates on the wear loss of a micro drill with a diameter of 0.10mm is discussed on the basis of changes in the wear loss of the outer corner and the chisel edge and thrust force for cutting distances. Since it is found that the diameter of the micro-drill is close to the size of crystal grain of workpiece, an influence of grain size on the tool wear is investigated by drilling SUS304 with the different grain size. The obtained results are as follows: (1) The wear loss of outer corner progresses faster with increasing feed rate, while that of chisel edge progresses faster with decreasing feed rate. Therefore, the particular feed rate like the critical feed rate in conventional drilling would exist in micro drilling, too. (2) When the diameter of the micro-drill is close to the grain size, the tool wear is smaller and the machinability is better for the workpiece with the fine grain size than that with the coarse grain size.

キーワード：微細ドリル加工，工具摩耗，切削抵抗，オーステナイト系ステンレス鋼，結晶粒

1. 緒言

近年，製品や部品の小型化，軽量化，高機能化が進み，機能及び機構の集約化，集積化を実現するための加工技術として微小径穴加工の重要性は高まっている。微小径穴加工法にはレーザ加工，放電加工，打ち抜き等が用いられているが能率性・汎用性・機械設備コストの面において必ずしも満足する結果は得られておらず，ドリル加工への依存が高い。またドリル加工は前述した他の加工法に比べて，特別な設備がなくてもできるので経済的であり，精度的にも優れている場合が多い。近年急速な発展を遂げている電子・精密・光学機器等の製造分野では，各種

機器の高性能小型化，信頼性の向上の面から，ドリルによる微小径穴加工が重要視されている¹⁾。これら微小径穴加工の被削材には高品質の材料を用いて性能を向上させようという観点から，従来の材料より高級な素材，例えばステンレス鋼や各種高級鋳鉄，ファインセラミック，複合材料(FRP, FRM など)，高合金の軽金属，焼結鋼などが使用されている。いずれも優れた特性を持つ材料であるが，機械加工が難しく，いわゆる難削材と言われるものが多い。難削材の加工データについては比較的数量多く出されているが微細ドリル加工についての加工データは少なく，加工技術が確立されていないのが現状である²⁾。

そこで本研究では上述の産業分野で多く利用されている耐食性に優れたオーステナイト系ステンレ

* 生産技術部 機械加工グループ

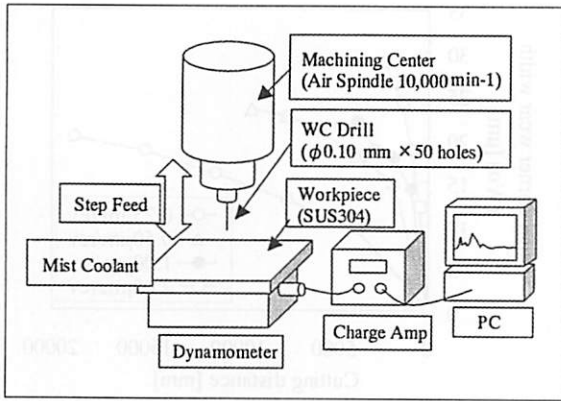


図1 実験装置の概要

Experimental apparatus

ス鋼 (SUS304) を取り上げた。ステンレス材は熱伝導率が低く、特にオーステナイト系ステンレス材は靱性が高く加工硬化しやすい材料でもあることからドリルが摩耗しやすい。また微小径ドリルではドリル特有の断面形状から剛性が非常に低く、熱容量が小さいため切削熱が蓄積しやすいなどの理由から容易に折損に至る³⁾。本研究では SUS304 に対して $\phi 0.1\text{mm}$ ドリルにより微細穴加工を行い、各種送り時のドリル外周部とチゼルエッジ部の摩耗およびスラスト方向切削抵抗の測定結果をもとに、送り量が工具摩耗に及ぼす影響について実験的に検討を行った。また微小径ドリル加工においては、ドリル径と被削材の結晶粒の大きさが相対的に近くなるため、被削材の結晶の大きさや配向が加工特性に影響することが予想される。そこで被削材の結晶粒径が工具摩耗や被削性に及ぼす影響についても検討を行った。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

SUS304 の穴あけには高精度微細穴加工が可能な空気静圧軸受スピンドル搭載立型マシニングセンタ (東芝機械 ASV650T) を用いた。また工具は (TiAl)N コーティング超硬ツイストドリル (菱高精機 直径 $\phi 0.10\text{mm}$, シャンク径 3.175mm , 有効長 1.68mm) を用いた。また、ドリル摩耗と加工時の切削抵抗の関係を調べるために、水晶圧電式切削動力計 (キスラー Type9272) の上に被削材を取り付けて加工を行い、ドリル送り方向の切削抵抗 (スラスト力) を測定した。動力計からの出力信号はチャージアンプ (キスラー Type5019A) を介して PC に取り込みデータ処理を行った。図1に実験装置の概要を示す。

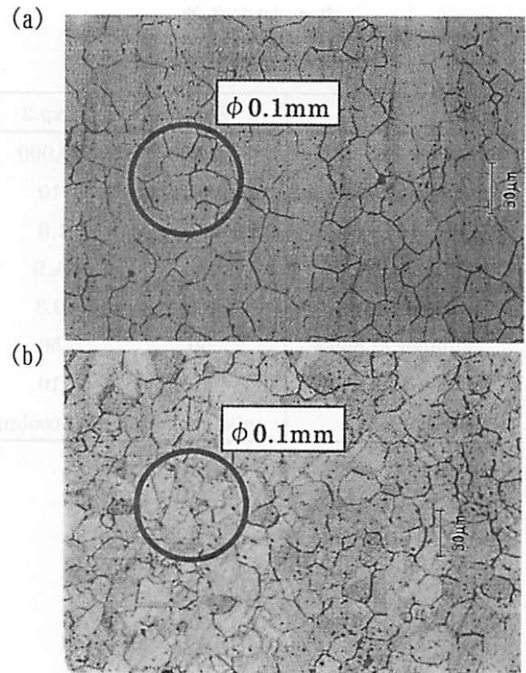


図2 試料の組織写真

((a)試料 A, (b) 試料 B)

Micrographs of workpiece

(2) 被削材

被削材は市販のオーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) の板材 ($50 \times 30 \times 5\text{mm}$) を用いた。この試料表面を鏡面状に研磨仕上げし、10% シュウ酸水溶液に数分間浸してエッチングを施し顕微鏡観察した。その組織写真を図2(a)に示す。結晶粒の大きさは $10 \sim 70 \mu\text{m}$ に分布しており、その平均粒径は約 $35 \mu\text{m}$ であった。

また結晶粒の大きさが工具摩耗に及ぼす影響を検討するため、平均粒径の異なる試料も作製した。オーステナイト系ステンレス鋼は変態点を持たないため、熱処理による結晶粒の微細化は困難である⁴⁾。そのためここではプレス加工と焼鈍を組み合わせることにより結晶粒を微細化させる方法を取った。その組織写真を図2(b)に示す。平均粒径は約 $20 \mu\text{m}$ であった。前者を試料 A、後者の微細結晶粒の試料を試料 B とする。なお硬さは両者とも Hv180 程度であった。

(3) 加工方法および加工条件

本実験の被削材への加工は全て、加工穴深さ 0.30mm の止まり穴とし、切屑詰まりを避けるためにステップフィード方式 ($10 \mu\text{m}/\text{step}$) による加工で、加工液はミストクーラント (米国 Blube 製) を用いた。加工条件と工具摩耗の調査では試料 A を用い、主

表 1 加工条件
Cutting conditions

	Exp.1	Exp.2
Spindle speed [min^{-1}]	10,000	10,000
Feed speed[mm/min]	2.5/5.0/10/20	10
Feed rate [$\mu\text{m}/\text{rev}$]	0.25/0.5/1.0/2.0	1.0
Workpiece	A	A,B
Hole depth	0.3	0.3
Number of holes	50	50
Step feed [$\mu\text{m}/\text{step}$]	10	10
Coolant	mist coolant	mist coolant

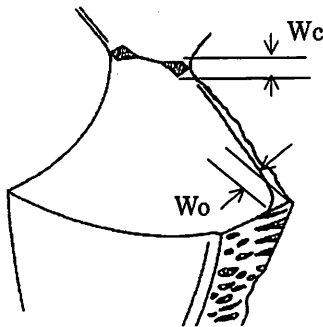


図 3 ドリル摩耗の定義
Definition of drill wear

軸回転数を一定とし送り量を変化させ実験を行った(実験 1)。結晶粒の影響の調査では、主軸回転数、送り量を一定とし、結晶粒径の異なる試料 A、試料 B について実験を行った(実験 2)。実験 1,2 の加工条件を表 1 に示す。

(4) 工具摩耗の評価

ドリルの摩耗は主に切刃部、チゼル部、マージン部に発生する⁹⁾。しかしドリルが $\phi 0.10\text{mm}$ と微小であるためマージン部の摩耗の測定は困難であった。そこで本研究では図 3 のように、切刃部及びチゼル部の摩耗をそれぞれ外周摩耗幅 W_o 、チゼル摩耗幅 W_c と定義して摩耗幅を測定した。測定には走査型電子顕微鏡 (Philips Electron Optics XL40) を用い、300 ステップ毎に測定を行った。

3. 実験結果および考察

(1). 送り量が工具摩耗に及ぼす影響

SUS304 に対する送り量と工具摩耗の関係を調査するため実験 1 では試料 A に対して主軸回転数を一定とし、表 1 に示す条件で各送り量に対して実験を

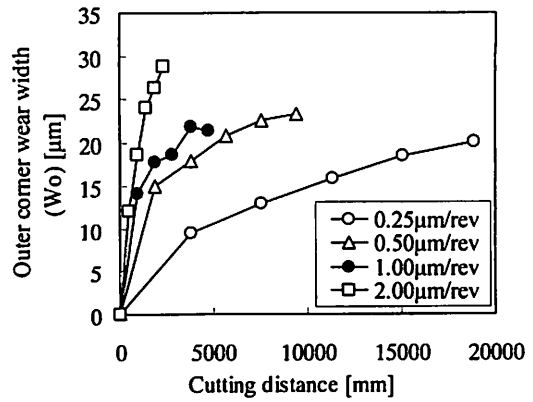


図 4 送り量が外周摩耗に及ぼす影響

Effect of feed rate on wear loss of outer corner

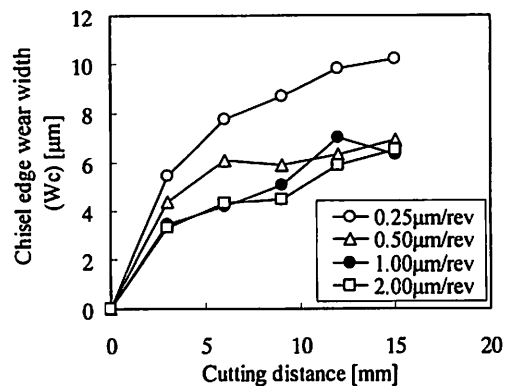


図 5 送り量がチゼル摩耗に及ぼす影響

Effect of feed rate on wear loss of chisel edge

行った。図 4、図 5 に外周摩耗 W_o 、チゼル摩耗 W_c と切削距離の関係を示す。外周部の切削距離は送り量、工具径と穴深さから算出した実切削距離であるが、チゼル部については工具中心に近いいため、近似的に加工穴深さを切削距離とした。

図 4 によると、外周摩耗 W_o は送り量が小さい程、切削距離に対する摩耗の進行は緩やかであり、送り量が大きくなれば工具初期状態から急激に摩耗が進行する。これに対して図 5 に示したチゼル摩耗 W_c は送り量が大きくなるほど切削距離に対する摩耗の進行は緩やかになっている、このように外周摩耗 W_o とチゼル摩耗 W_c は送り量の増大に対して逆の傾向を示すものとなっている。

ここで通常径のドリルに対する寿命推定式をもとにこの現象を考察する。一般にドリル寿命は各種加工諸元のうちで重要なものを用いて次式のように表されている⁹⁾。

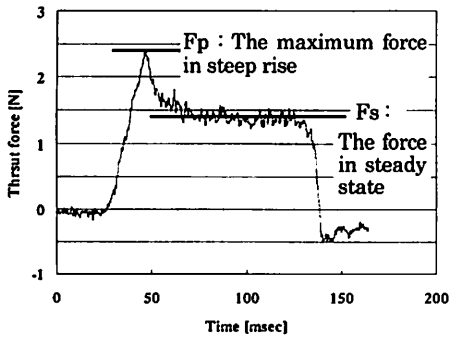


図6 スラスト力の定義

Thrust force in micro drilling

$$LV^\alpha f^\beta l^\gamma d^\lambda H_B^\eta = Const. \quad (1)$$

(L : 工具寿命 (mm) V : 切削速度 (m/min) f : 送り量 (mm/rev) l : 穴深さ (mm) d : ドリル径 (mm) H_B : 被削材硬さ, $\alpha \beta \gamma \lambda \eta$: 各定数)

本実験ではドリル径 d , 穴深さ l , 被削材の硬さ H_B が一定であることから式(1)は,

$$LV^\alpha f^\beta = Const. \quad (2)$$

で表される。さらに実験1では主軸回転数も一定(切削速度一定)であることから,

$$Lf^\beta = Const. \quad (3)$$

となる。式(3)で表されるドリル寿命は送り量のみの関数であり、送り量が小さいほど寿命は長いことを示している。

実験1によると、外周摩耗 W_o は送り量が小さいほど摩耗の進行が遅いことから上記寿命の傾向に一致する。しかしチゼル摩耗 W_c については送り量が減少すると摩耗がより早く進行しており、式(3)の傾向と異なる。このようにドリル先端の部位によって送り量に対する摩耗の進行状況が異なる。一般にドリル加工では送り量に関して臨界送りが存在し、その送り量を超えて小さい送りになると構成刃先の発生や加工硬化が大きくなるため、逆に工具寿命が短くなることが指摘されている⁹⁾。微小径ドリル加工でも送り量に対する工具摩耗の傾向は従来ドリル径の場合と同様の現象が生じている。

そこでスラスト力の測定結果をもとにこの臨界送り量について検討を行った。ステップフィード方式の各1stepに対するスラスト力の時間的推移を図6に示す。この波形においてドリル食付き時における初期の立ち上がり値 F_p , 平均値である静的成分 F_s

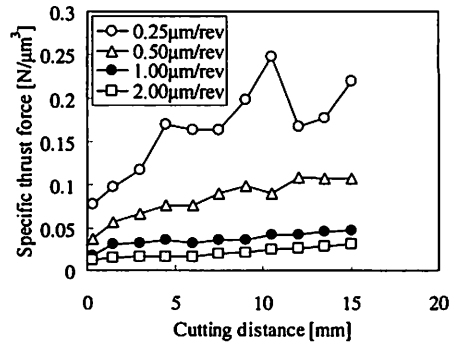


図7 切削長さ と比切削抵抗の関係

Relation between cutting distance of chisel edge and specific thrust force

を計測した。ここでは送り量の大小の影響を除去するため、 F_s をもとに算出した比切削抵抗と切削長さ(加工穴深さ)の関係を求めた。その結果を図7に示す。図によると送り量が低送りである $0.25 \mu\text{m/rev}$, $0.50 \mu\text{m/rev}$ の場合に比切削抵抗は $1.00 \mu\text{m/rev}$, $2.0 \mu\text{m/rev}$ に比べて高く、上記で述べた低送り時に生ずる構成刃先や加工硬化の影響が推測される。また図4に示したように、外周部は送り量 $2.0 \mu\text{m/rev}$ では急速に摩耗する。したがって本実験における最適送り量は $1.00 \mu\text{m/rev}$ 付近と考えられ、これは臨界送り量に近いものであろう。

(2) 結晶粒の大きさが工具摩耗に及ぼす影響

微小径ドリル加工においては、ドリル径が被削材の結晶粒の大きさに近づくため、被削材の結晶粒の大きさや配向が加工特性に影響すると考えられる。そこで試料Aと結晶粒微細化処理を行った試料Bに対して、表1の実験2に示す条件で穴あけ加工を行い結晶粒の大きさが工具摩耗に及ぼす影響を調べた。試料A, 試料Bに対する外周摩耗 W_o , チゼル摩耗 W_c と切削距離の関係を図8, 図9に示す。図によると外周部 W_o , チゼル部 W_c とも試料Bの方が摩耗の程度は少ない。またドリルの被削材への食付き状況を表すものとして、図6に示したスラスト力の立ち上がり値 F_p に注目し、 F_p と切削距離の関係を調べた。結果を図10に示す。この場合もスラスト力は試料Aよりも試料Bのほうが小さく、材料の硬さがほぼ同じであることを考慮するとドリルの被削材への食付き状況は試料Bの方が良いように思われる。これらの結果から、微小ドリル加工ではドリル径に比べて結晶粒が相対的に小さいほど工具摩

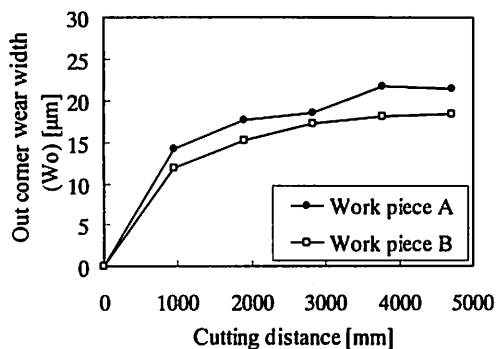


図 8 被削材の結晶粒径と工具外周摩耗の関係
Relation between grain size of workpiece and wear loss of outer corner

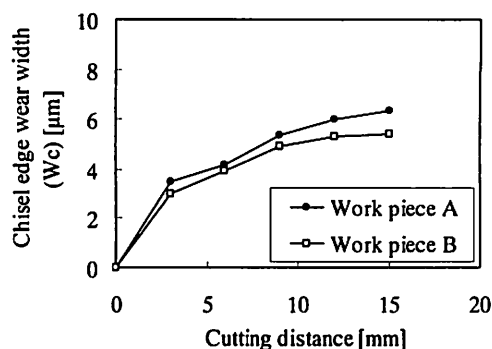


図 9 被削材の結晶粒径とチゼル摩耗の関係
Relation between grain size of workpiece and wear loss of chisel edge

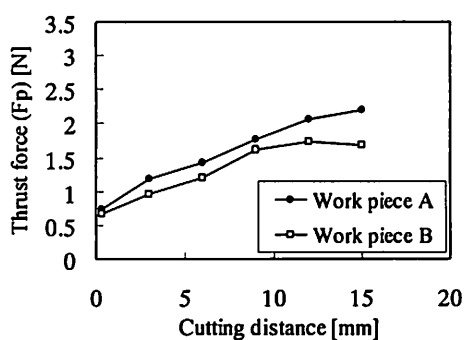


図 10 被削材の結晶粒径と切削抵抗の関係
Relation between grain size of workpiece and thrust force

耗は小さく、被削性も良くなるものと考えられる。

次に結晶粒径微細化による工具摩耗の低減が、ドリル径が異なる場合にも観測されるかどうか検討するため、 $\phi 0.3\text{mm}$ のドリルを用いて試料 A、試料 B に対する穴加工の工具摩耗状況を調べた。実験条件は、 $10,000\text{rpm}-3.0\mu\text{m/rev}$ 、 $30\mu\text{m/step}$ で 1 穴の深さは 0.9mm の止まり穴とした。外周摩耗、チゼル摩耗と切削距離の関係を図 11、図 12 に示す。図によるとドリル径 $\phi 0.3\text{mm}$ では試料 A、試料 B におけるドリル摩耗の進行度合いに差は見られない。したがってドリル径が結晶粒径に比べて相対的に大きくなれば上述の効果は現れない。

この結果について検討を行うため加工穴周辺を観察した。図 13 は試料 A における切削距離 1000mm 時の加工穴付近の電子顕微鏡写真で、一部の方向に顕著なすべり線状のものが観察された。本実験で用いた試料 A は、図 2(a)の組織写真によれば $10\sim 70\mu\text{m}$ の大きさの結晶粒が分布しており、加工穴周辺には粒径の大きい部分や小さく密に存在している部

分が混在する。図 13 で観察されたこの線は主に粒径の大きい部分で発生していた。

金属材料はそれぞれの金属に特有のすべりやすい結晶面、結晶方向が存在する。結晶粒に対してある方向に力が加わった場合、力の向きに対して 45° 方向でせん断応力は最大となる。その最大剪断応力方向がすべりやすい結晶面、結晶方向に一致する場合容易にすべりが生じ、すべり線が発生する⁴⁾。本実験で用いた SUS304 材は面心立方構造をしており、 $\{111\}$ 面上の $\langle 110 \rangle$ 方向にすべりやすい⁴⁾。しかし多結晶材料ではすべりが生じると、結晶粒界がすべりに対して障害となる。そのため、結晶粒の大きい方がすべり量は大きくなることが予想され、上述の結晶粒の大きい部分にすべり線が観測された結果はこのことを示しているものと思われる。また、図 13 のすべり線が存在する部分のピッカース硬さを調べたところ、 $Hv400$ 程度と大きくなっていった。したがって今回の実験では、結晶粒の大きい部分ではすべりや加工硬化は結晶粒の小さい部分に比べて大きくなっているものと思われる。

すべりの発生を抑制するために結晶の方位を意図的に制御するのは困難であるが、試料 B のように結晶粒を調整して微細化すれば、塑性変形がしにくくなり、変形の不均一も抑制されることから加工硬化の低減、ドリル摩耗の低減につながると考えられる。しかしこれはドリルが加工時に作用する結晶粒の数とも関係していると考えられ、ドリル周りの結晶粒の数が多い $\phi 0.3\text{mm}$ のドリル径では結晶粒微細化による摩耗への影響は見られない。したがってドリル径が結晶粒径に相対的に近い場合にこの効果が大

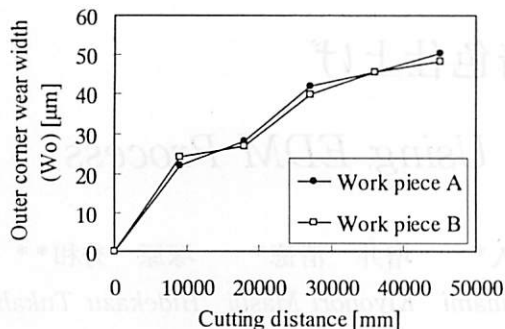


図 11 被削材の結晶粒径と工具外周摩耗の関係 (ドリル径φ0.3mmの場合)

Relation between grain size of workpiece and wear loss of outer corner (drill diameter: φ0.3mm)

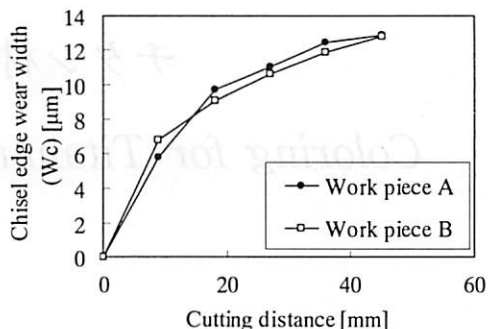


図 12 被削材の結晶粒径とチゼル摩耗の関係 (ドリル径φ0.3mmの場合)

Relation between grain size of workpiece and wear loss of chisel edge (drill diameter: φ0.3mm)



図 13 加工穴周辺の電子顕微鏡写真 SEM micrograph around drilled hole

大きく現れるものと考えられる。

3. 結言

オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS304) への微小径ドリル加工に関して、送り量とドリル外周部、チゼルエッジ部の摩耗量の関係および結晶粒の大きさが工具摩耗に及ぼす影響について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 外周部の摩耗は送り量が増大するほど早く進行するが、チゼル部では逆に送り量が減少するほど摩耗の進行が早くなる。そのため微小径ドリル加工においても、従来ドリル径における臨界送り量に相当する送り量が存在する。
- (2) 微小径ドリル加工では、ドリル径が被削材の結晶粒径に相対的に近くなると、微細結晶粒の被削材ほど加工硬化の影響が少なくなるため工具摩耗が少なく被削性も良くなる。

参考文献

- 1) マイクロ加工技術編集委員会, マイクロ加工技術, 81-90 (1977)
- 2) 鳴瀧則彦, 難削材の切削加工, 1-2 日刊工業新聞社 (1989)
- 3) Thangraj, A, Wright, P.K, "Computer assisted Prediction of Drill failure Using In-Process Measurements of Thrust Force", Journal of Engineering for Industry, 110, 193-200 (1988)
- 4) 矢島悦次郎, 市川理衛, 古沢浩一, 若い技術者のための機械・金属材料, 74-76, 198-201, 丸善 (1979)
- 5) 白井英治, 切削・研削加工学上-切削加工-, 334-340, コロナ社 (1971)
- 6) E.Aoyama, T.Hirogaki, H.Inoue, M.Nishizawa, K.Yamura, H.Nobe, T.Katayama, "Study on Small Diameter Drilling for Printed Wiring Board", Fiber Reinforced Composite 2000, (2000)
- 7) 井上久弘, 川口格, プリント基板の穴あけ加工に関する研究, 精密工学会関西支部創立 50 周年記念講演論文集