超精密切削加工に関する研究*

—超精密旋盤の試作と若干の実験—

江田 弘** 貴志浩三** 野村和司*** 荒川直也†

Investigation of Ultra-high Precision Cutting

—Trial Manufacture of Ultra-high Precision Lathe and Some Experimental Studies—

Hiroshi EDA, Kozo KISHI, Kazushi NOMURA and Naoya ARAKAWA

This research is primarily aimed, in order to generate mirror surfaces, a personal computer control prototype ultra-high precision lathe has actually been built. Further, the equation of whether the said cutting theory derived from dislocation theory capable of explaining the ultra-high precision cutting mechanism, observed in experiments employing the PC control ultra-high precision lathe was also studied. (1) The ultra-high precision machined surface roughness achieved with aluminium was $R_{\max}=0.01\ \mu\text{m}$ in PC control system. And also, the flatness is $0.1\ \mu\text{m}/\phi 50\ \text{mm}$. (2) The shearing stress computed based on dislocation theory closely coincides with that obtained from macroscopic machining experiments. (3) A PC controlled ultra-high precision lathe capable of the results in (1) through (2) above has successfully been constructed on an experimental basis.

Key words: personal computer control, ultra-high precision lathe, ultra-high precision cutting theory, aluminium alloys, OFHC copper

1. ま え が き

日本の超精密加工技術は谷口、津和、小林ら¹⁾の努力によって欧米に優るとも劣らない仕事が蓄積されつつある。既に日立、東芝、豊田、不二越²⁾では超精密旋盤を製造しているが、欧米を含め、ノウハウにかかわる問題をほとんど公表していないのが実状であろうと考える。

本報告は、超精密旋盤を内製するに際してキーポイントとなる点を研究室での体験を踏まえて述べるものであり、いささかなりとも試作に関して工業的寄与を考えるものである。

また磁気ディスク基板の超精密切削加工においても明らかのように、切削表面の空孔、不純物の露出、結晶粒界に生ずる段差などの材料に関する問題³⁾は何を追及してどのように改善すべきか、その方策を立てること自体暗中模索の状態と言える。ここに現在光学、

電子用部品に使われている超精密切削用アルミニウム材料を中心に無酸素銅等について超精密切削加工表面を得るための材料的な検討を加えたので報告する。

2. マイクロコンピュータ制御超精密旋盤の試作

2.1 旋盤の全体像

完成した超精密旋盤の全景を図1に示す。第1号機はTurning方式をとったが²⁾、本機は以下の仕様となった。

切削方式: Fly cut

主軸回転数: 0~8 000 rpm

テーブル速度: 1 mm/min~1 m/min

切込み: $d=1\sim 20\ \mu\text{m}$

(テーブル速度/主軸回転数)の最小精度: $0.1\ \mu\text{m}/\text{rev}$

主軸、テーブルとも米国 Professional Instruments (PI) 社のもので、例えば主軸は溝補償方式³⁾で軸受面の溝によって軸受空気薄膜の圧力が制御され軸受の変位に比例する復元力が発生し、姿勢を安定に保つよう設計されている。半径方向剛性 $12\ \text{kgf}/\mu\text{m}$ 、軸方向剛性 $36\ \text{kgf}/\mu\text{m}$ 、円周方向剛性 $0.046\ \text{kgf}\cdot\text{m}/\mu\text{m}$ 、半径方向運動精度 $0.05\ \mu\text{m}$ 、軸方向運動精度 $0.05\ \mu\text{m}$ 、

* 原稿受付 昭和59年11月28日、昭和57年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和57年10月18日)および昭和58年度精機学会春季大会学術講演会(昭和58年3月28日)にて発表

** 正会員 宇都宮大学工学部(宇都宮市石井町2753)

*** 宇都宮大学大学院(現、正会員、日本光学工業(株))

† 学生会員 宇都宮大学大学院(現、古河電工(株))

Fig. 1 Overall view of experimental equipments

円周方向運動精度 $0.2 \mu\text{m}$ である。またテーブルは左右、前後とも剛性 $50 \text{ kgf}/\mu\text{m}$ 、真直度 $0.1 \mu\text{m}/100 \text{ mm}$ (オートコリメータ) である。

2.2 静圧空気、配管、雰囲気、切削液の調整

静圧圧縮空気は、可動時 $10.5 \text{ kgf}/\text{cm}^2 \text{ G}$ 、作業休止時は $3.5 \text{ kgf}/\text{cm}^2 \text{ G}$ に制御され、カーボンフィルタを使用して $2 \mu\text{m}$ 以上の固形粒子が混入しないよう注意している。また残留油蒸気、タールおよび樹脂等を濾過し、有機汚染物の吸着作用の高い活性炭の使用と静圧面さび止め気相抑制剤を用いた。この気相抑制剤は静圧面内組込みフィルタの目詰まり防止も行う。

空気乾燥剤(デリケセントペリット)は空気中の蒸気と結合し液体となり硬質樹脂パイプを通じて室外へ排出される。このようにして圧縮空気は加圧下で相対湿度 70% 以下、空気温度 293 K 以下でたえず一定に保たれる。空気の冷却はフロンガスを用いるが、ほかにもいろいろの冷媒がある。いずれにしる雰囲気湿度、温度と同値の静圧空気に近づけ変動値も極力小さくし、空気排出域で起こる飽和蒸気圧変化に伴う結露によるさび発生を避けるべき注意をもった。

配管は、管壁が酸性やアルカリ性に富むと反応生成物を生じるために、中性に近い耐圧性硬質高分子樹脂のパイプ(図 1)を中和とフラックス洗浄処理を十分に施して用いた。硬質の理由は締結部以外で機体に接触し空気分子などの脈動による振動を絶縁するためである。したがってコンプレッサ室は床面を絶縁した別棟に配置した。次に雰囲気は恒温(293 K)、湿度(50%)一定とし、空気清浄度をクラス 100 くらいにすることが望ましいが、本実験ではクラス 100 000 くらいの特

別じんあいの少ないルームを製作し、空気の供給はダウフロー方式として層流のまま床から抜けるようにした。換気を止めると切削点が唯一の空気揺らぎ源となるため、ルーム内に舞い上がった綿状切りくずは一定の空気流路を経て再び元の発生源に戻るブーメラン現象を呈する。そのため、じんあい侵入防止用ビニルカーテンには静電防止剤の塗布とかそれ用のカーテンを用いることが大切で、他の粉じんも含め一切固形粒子が蓄積しない工夫を講じた。もちろん人間は粉じんの発生源であるし、約 $0.1 \mu\text{m}$ オーダ以上の大きいバクテリアも鼻腔から鼻口が四季を通じて恒温恒湿槽となっており、ま

さに繁殖源ゆえ、医用殺菌マスクおよび専用上下服、帽子の着用を遂行した。

切削液は市販の白灯油を約 $2 \mu\text{m}$ 以下の粒子混入のみにフィルタリング(SiC)し、切削点に $\phi 0.8$ 孔径の注射針で工具下方から $2 \text{ kgf}/\text{cm}^2 \text{ G}$ の注液圧で噴出させ、上方でこれからの飛散物を吸引する仕組みとした。切削液温は 293 K に調節した。

2.3 ジグ、工具、部品

超精密旋盤は図 1 に示すように花こう岩の定盤(三豊製)の下に空気ばねを 4 基設置し、更にその下に防じん用ビニルで包装した高耐振性の大谷石(宇都宮市産出)を配置した。そしてその下にマシンベースがある。グラナイト定盤と機械の接合⁴⁾は減衰性の高いエポキシ系接着剤(エポキシ樹脂 CIBA Aw 106, ポリアミド硬化剤 Hv 953 U, 混合比 5:4)を使った。この接着剤は引張りせん断接着強さが 10~15 MPa、硬化前の粘度が常温で 30~40 Pa·s、硬化時の体積収縮率が約 2.4%、硬化物の横弾性率 $G=0.1 \text{ GPa}$ 、減衰係数 $c=4.5 \text{ MPa}\cdot\text{s}$ 、接着剤部分のばね定数 100 GN/m、接着層厚さ 0.2 mm になっている。さらに機体の四隅を接着してある L 型ジグで押さえた。また静圧主軸、テーブルの取付台は高炭素片状黒鉛鋳鉄(オーステナイト)の減衰係数 20% よりも更に高い 7 000 系の Al-Zn(減衰係数 30%)を用いた。この理由は転位型防振機構より、母相と析出相との界面または粒界の粘性流動による方が防振寿命が永いためである。

工具は、単結晶天然ダイヤモンド(東京ダイヤモンド工具製)ミラクルおよび完全 R パイトを用いた。工具の取付けは不釣合いに対して細心の注意を払う必要

がある。バイトホルダとその締付具は前記基本要件を満足する寸法形状（高強度 Al 合金， T_6 処理）に設計した。また工具取付部はテーパ形状とし、動釣合試験でとれない不釣合い量はゴム粘土を付着してとった。さらに加工精度のランナウトや加速度に対して重大な影響を及ぼす工作物のチャックの寸法形状は十分に検討し、定めた。材料は高比強度、低密度および工作物に傷をつけないことを念頭に Al 合金（7075， T_6 処理）とした。ただしチャック面板はほかに加工径に対応して 3 種作製した。エアチャックは 400～500 mmHg で吸着し、動作方式はレギュレータ、ソレノイドバルブ、真空発生器およびサイレンサを用いて PC 制御によって着脱および誤動作確認を行った。

2.4 パーソナルコンピュータによる制御

2.1 節で述べた主軸，テーブルの PC 制御機器は以下の通りである。

パーソナルコンピュータ：PC-8001 本体（NEC）

ディスプレイ：PC-8050 K（NEC）

プリンタ：RP-80（EPSON）

ミニディスクユニット：5 $\frac{1}{4}$ " フロッピーディスク PC-80 S 31（NEC）

I/O ユニット：PC-8013（NEC）

増設 RAM：PC-8006（NEC），拡張ユニット PC-8011

DC サーボモータ：ミナーシャモータ UGPMEN-08 DAOF，UGPMEN-09 AF，タコゼネ TG，オブチカルエンコーダ PG 付き（安川電機）

サーボバック：CPCR-FROIB-T 6 L（同上）

ポジションバック-10：CPCC-PP 10 B（同上）

サーボモータ制御電源トランス：CPT 8570，200 VA（同上），CPT-8588，300 VA

この機器を用いた PC 制御の系統図は図 2 に示す通りで，DC サーボによる主軸，テーブルの駆動およびソレノイドバルブ，電気マイクロメータの動作がスムーズに行われる。P.P.I. 8255 AC-5 などのインタフェー

Fig. 2 Control system by use of personal computer

Fig. 3 Connecting circuit diagrams for controlling DC servomotor

スはすべて研究室製である。たとえばテーブル駆動のバルス列指令，符号指令およびその判別は図 3 に示すようなブロック線図の系統に従って制御される。本システムのソフトは省略するが，すべてプログラムはフロッピーディスクに格納され，入力，コマンド受付，割込み等はメニュー方式を採用している。

以上のような機器を備え，いろいろな手探りを経て完成した PC 制御超精密旋盤が図 1 に示したものである。旋盤の性能を調べる意味で，周波数分析（加速度計 Brüel & Kjær 製，4375 型，ピエゾ）を行った一例を図 4 に示す。図 4 上図は主軸が 2 122.1 rpm，テーブル 63.664 mm/min で本実験の上限で最も振動が大となる時であり，同中図はその条件で切込み 5 μ m で切削している時，共に主軸に加速度計をつけて測定した。また工作物のチャックに加速度計をつけて調べた例が同下図である。切削音は聴こえない。後述するが，ここに見られる周波数が仕上面粗さやうねりには現れなかったため，本旋盤は超精密切削加工に十分使用でき

Fig. 4 Power spectrum of frequency in lathe driving

と考えられる。

3. 超精密切削加工

3.1 実験条件

被削材は表1に示すAlの純度と被削性が良いAl-Cu系のCu量を変えた種類のほかに、99.995%、99.96%の無酸素銅(0.0001 O₂ vol%), 6-4黄銅を用いた。

切削は、切削速度 $V=0\sim600$ m/min, 送り速度 $f=0\sim30$ $\mu\text{m}/\text{rev}$, 切込み $d=0\sim30$ μm , 切削液(白灯油),

Fig. 5 Actual machined samples

ミラクルバイトを用いた条件で行った。

仕上面粗さはタリステップ(於計量研究所), 形状精度はロンコムC(東京精密製)をそれぞれ用いて測定した。また表面は微分干渉顕微鏡(ユニオン光学製IC-1082), 走査電子顕微鏡SEM(日立S-570形), 透過電子顕微鏡TEM(日本電子JEM-200C)によって観察した。

3.2 実験結果および考察

図5はOHFC 99.995%を $V=300$ m/min, $f=2.7$ $\mu\text{m}/\text{rev}$, $d=2$ μm で切削した時の表面を示す。この表面は反射率95%, 仕上面粗さ $R_{\text{max}}=0.01$ μm , 平面度 0.1 $\mu\text{m}/\phi 50$ mmで, うねりや突発的な地疵はほとんど認められない。また粗さの周波数解析も試みたが, 前記機械の周波数に相当するような位置でのパワースペクトルの存在は確認できなかった。したがって前述のパワー程度では仕上面粗さを形成するほどのレベルに達していないことがわかる。以上の結果からすると, 仕上面粗さ $R_{\text{max}}=0.01$ μm , 平面度 0.1 $\mu\text{m}/\phi 50$ mmが保証できる旋盤が試作されたことになる。

次に各材種についてどのような超精密表面が得られるか確かめる。この時の切削表面は図6に示すように結晶粒や不純物が明りょうに現れ, それ自体が粒界での段差, 突起, くぼみを形成する。結晶粒界の段差は結晶粒の弾性係数と方位によると一般的に考えられているが, その値は数十nmから数百nmに達する。

Table 1 Chemical compositions of workpieces (Al, Al-alloy)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Cr	Al	HV
99.99%	0.002	0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	—		19.5
99.95%	0.012	0.015	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	—		15.8
99.9%	0.028	0.054	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	0.002	—		21.3
99.7%	0.070	0.17	0.009	0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.006	—		26.1
Al-0.5Cu	0.002	0.001	0.56	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	—		27.2
Al-1.5Cu	0.005	0.001	1.49	<0.001	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	—		39.5
Al-3.0Cu	0.004	0.002	2.96	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	—		56.4
Al-4.5Cu	0.004	0.003	4.80	<0.001	<0.001	0.004	<0.001	0.002	—		94.0

Fig. 6 The machined surface with a differential interference microscope
Feed rate; $2.7 \mu\text{m}/\text{rev}$, Cutting speed; $300 \text{ m}/\text{min}$, Depth of cut; $2 \mu\text{m}$

そこでこれらの段差や表面の凹凸を軽減するために表1に示すように、金属間化合物を晶出するSi, Fe, Cu, Mg, Ni, Zn, Tiを極力減じ、同時に溶解後非金属介在物 Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO 等の硬質粒子の混入をSiCフィルタなどを通して数 μm 以下に清浄化した。また粒界段差を減じるため $723 \text{ K} \times 10 \text{ h}$ (純Al), $793 \text{ K} \times 10 \text{ h}$ 溶体化処理後水冷(Al-Cu)を行った。99.99%Alについては粒界のみが現れるだけであるが、99.7%(JIS 1100)に近づいてくると粒界に Al_3Fe , $\text{Al}_{15}\text{Fe}_8\text{Si}_5$, Al_4FeSi を晶出することがある。Al-Cu系についてはCuが十分固溶しているはずであるが、溶体化温度が高すぎると三重点に相当する粒界に再溶解した共晶組織、偏析 CuAl_2 , Mg_2Si , $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ または不純物Feを固溶した $\text{Al}_6\text{Mn}(\text{Fe})$ が生成する。以上のことを注意し、それぞれの添加元素の純度を出来る限り向上したところ、純Al系について、 1 cm^2 当たり $1 \mu\text{m}$ 以上の粒子数は99.9~99.99%ではほとんど認められない。また99.7%では(1~2)個/ cm^2 、時々みられる。Al-Cuについて0~45% Cuの範囲でほとんど認められなかった。

図7は $V=600 \text{ m}/\text{min}$, $f=20 \mu\text{m}/\text{rev}$, $d=5 \mu\text{m}$ で切削した時の99.99%Al, 99.7%Al, およびAl-1.5% Cu, 4.5%Cuの切削表面を示す。残りの%のものほぼ同様な表面を呈し、純度低下およびCu添加について送りマークが顕在化する。いずれにも空孔や突起が認められず所望の表面が得られている。ただし表面

Fig. 7 The machined surface by purity and Al-vari. Cu

Fig. 8 The surface roughness of mirror cut

のランダムな引っかかり傷は脱脂綿でふいた時の綿中のほこりによって起きたものである。また表面が鮮明に撮影されていないのは反射率が95%以上と高いためである。

図8は、高純度AlおよびAl-vari, Cuを $V=300 \text{ m}/\text{min}$, 切込み $d=5 \mu\text{m}$, $f=10, 15, 20, 25, 30 \mu\text{m}/\text{rev}$ の仕上面粗さを示す。仕上面粗さは99.99%が最も細密で最高10 nmであるのに対して、純度が低下するにつれて粗となり、99.7%で約5~10 nm増加する。Al-Cu系に比べて f による増減が小さいのは延性に富む

Fig. 9 Typical chip profile of ultra precision cutting
60/40 brass, $V=125$ m/min, $f=30$ mm/min,
 $d=5$ μ m

ため塑性流動が大きくなるためと考えられる。このことは図7の純Alの送りマークが不明りょうであり、99.99と99.7%で変化が少ないことから言える。これに対してAl-Cu系は f に対して敏感に変化し、0.5%Cuが約10 nmで最も密な面を形成するのにに対してCu量増加に伴って粗面化し、4.5%Cuで約10 nm低下する。またOFHC (99.995%)はAl-Cuよりも敏感に変化し $f=10$ μ m/revで $R_{\max}=15$ nm, $f=30$ μ m/revで25 nmであり、この間は直線的に変わる。さらに、 $V=600$ m/minに増速すると同順に $R_{\max}=8$ nmと20 nmに向上する。99.96% OFHCは上述の値より若干低く、より粗面を呈する。この結果ベースの元素の純度が高く、かつ添加元素も高純度なほど細密面を形成する。また基地が硬いほど V, f による変化が大きくなることがわかる。このような切削が行われている時は、Zowolkin-Piispanenの切削モデル、すなわち図9に示すようなランプカードを押し倒した時にできる層状構造の流れ形切りくずができる。また切りくずはBlackら⁵⁾が示した、Lamellar間に生ずるShear frontもみられ、比較的規則性をもってせん断すべりが起きている様子が観察される。

図10は、左図がHB-500型(昌運カズヌーブ)、右側が超精密旋盤で切削したときの切くず内部構造の代表的な例を示す。普通切削の結晶粒は切削方向に層状に変形し、転位の集積も大で、再結晶しており、ほかにモアレじまやセル壁の形成、等厚干渉じまなどがよくみられ、実測による転位密度は $8.0 \times 10^{11} \sim 5.0 \times 10^{12}$ と異常に増大している。一方、超精密切削の結晶粒はより円形に近く変形も小さく、再結晶、転位のもつれ、モアレじま、等厚干渉じまの形成も普通切削に比べると著しく少ない。

そこで、Trukovich⁶⁾が上記の切削機構についてよく成立すると言う線形転位理論に立脚し、転位密度からせん断面のせん断応力を算出する。

Conventional cutting

Ultra precision cutting

Fig. 10 The internal structure of chips
99.96% Al, $V=600$ m/min, $f=5$ μ m/rev, $d=5$ μ m

らせん転位と刃状転位混在下における平均せん断ひずみ γ_{av} は式(1)となる。

$$\gamma_{av} = b\rho l \quad (1)$$

ただし、 l : 転位の平均距離、 ρ : 転位密度、 b : パーガスベクトル (3×10^{-7} mm) である。

そこでせん断ひずみ速度 $d\gamma/dt$ は、

$$\frac{d\gamma_{av}}{dt} = b\rho \frac{dl}{dt} + b \frac{d\rho}{dt} l \quad (2)$$

となる。ここで $l=1/\sqrt{\rho}$ と仮定すると、式(3)を得る。

$$\frac{d\gamma_{av}}{dt} = \frac{b}{2\sqrt{\rho}} \frac{d\rho}{dt} \quad (3)$$

また転位を生成する単位時間当たりのせん断エネルギー U_s とせん断面のせん断応力 τ_s は式(4)で表される。

$$\frac{U_s}{dt} = \tau_s \frac{d\gamma_{av}}{dt} = E_d \frac{d\rho}{dt} \quad (4)$$

ただし

$$E_d = \frac{Gb^2}{8\pi} \left(\frac{1}{1-\nu} + 1 \right) \left[\log \left(\frac{r}{r_0} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

で転位の自己エネルギー E_d 、 G : 剛性率、 ν : ポアソン比、転位心半径 r_0 、心からの距離 r である。

一般に $r_0 \approx 5b$ であるから、 $E_d = KGb^2$ と書ける。ただし $K=0.10$ から0.33、ここでは $K=0.15$ とする。式(3)を式(4)に代入し、単位をkgf, mmにそろえると

$$\tau_s \frac{b}{2\sqrt{\rho}} \cdot \frac{d\rho}{dt} = KGb^2 \frac{d\rho}{dt} \quad (6)$$

$$\tau_s = 0.3Gb\sqrt{\rho} \quad (7)$$

を得る。

たとえば、図10の普通切削の $\rho=10^{12}$ cm $^{-2}$ であるから、 $G=2.3 \times 10^{11}$ dyn/cm 2 を代入すると $\tau_s=19.7$ kgf/mm 2 、右図の超精密切削について、 G は同値とし

Machined surface

5 μm deep beneath the machined surface

Fig. 11 The internal structure from machined surface
 $V=600 \text{ m/min}$, $f=5 \mu\text{m/rev}$, $d=5 \mu\text{m}$

て、 $\rho=5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ となるので、これを代入すると $\tau_s=4.4 \text{ kgf/mm}^2$ となる。

τ_s 値の差異は普通切削のせん断領域は広範囲に及ぶのに対して、超精密切削の層状切りくずの場合はより単一せん断面に応力が集中し層状すべりを形成するためにせん断すべり関与面から遠ざかると激減するためと考えられる。転位密度の増加、再結晶および粒の変形が少なかったことから考えられる。このことは切削表面から深さ方向にみた TEM 観察にも現れている。

図 11 は 99.7% の切削表面(上図)、切削表面から約 5 μm 深さ(下図)の内部組織を示す。切削表面の組織は、転位増殖が大で、再結晶がかなり進んでいるのに対して、5 μm 下層になると再結晶は認められず、転位線のもつれもそれほど顕著でない。ほかの条件でも調

べたが、切込み $d \leq 30 \mu\text{m}$ 、送り速度 $f \leq 30 \mu\text{m}$ 、切削速度 $V \leq 600 \text{ m/min}$ の範囲では、条件が厳しくなっても約 15 μm の深さで図 11 下図程度、 $\rho=10^9 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$ になる。したがって普通切削に比べて加工層厚さは 1/20~1/60 に軽減する。

4. 結 言

- (1) パーソナルコンピュータ超精密旋盤を試作したところ、仕上面粗さ $R_{\text{max}}=0.01$ 、平面度 0.1 $\mu\text{m}/\phi 50 \text{ mm}$ の加工精度が得られる旋盤ができた。
- (2) 切削表面の空孔や粒子の露出による突起は、合金元素の純度を現状より約 2 けた上げたり、十分な固溶体を作ることにより約 1 μm 以上の欠陥をほとんど観察できない程度に減少できる。
- (3) 超精密切削における切りくずは、せん断応力により単一せん断面に集中して作用するため層状構造の切りくずが排出する。
- (4) 超精密切削の加工層厚さは、普通切削の 1/20~1/60 程度であった。

終わりに本研究は日本光学工業(株)、昭和軽金属(株)、(株)三豊製作所、日本精工(株)、東京ダイヤモンド工業(株)、日本鋳業(株)の協力、また軽金属奨学会研究教育資金の援助によったことを付記し、深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 熊谷記念会編：超精密加工技術，工業調査会（1984）。
- 2) 江田 弘，貴志浩三，上野秀雄：超精密加工における被削材の問題，マシニスト，28，2（1984）56。
- 3) U. S. Patent, 3,305,282.
- 4) 碓井雄一，坂田興亜：接着によって組立てられた旋盤主軸の特性，精密機械，50，9（1984）150。
- 5) J. T. Black：On the Fundamental Mechanism of Large Strain Plastic Deformation Processes, Trans. ASME, B, 94, 1, (1972) 307.
- 6) B. F. von Trukovich：Shear Stress in Metal Cutting, Trans. ASME, B, 92, 1, (1970) 151; *ibid.*, B, 84, 4, (1963) 357.