

## 超精密ダイヤモンド切削加工技術

小林 昭\*  
Akira KOBAYASHI

**Key Words:** Ultra-Precision, Diamond Cutting, Manufacturing of Optical Parts, Air Bearing, Machine Tool, Laser, Accuracy, Diamond Tool

### 1. はじめに

年とともに部品加工に対する要求精度は厳しくなるいっぽうであり、先端産業においては特にその傾向は著しい。しかもたんに寸法精度が必要とされるばかりでなく、真円度・円筒度・平面度といったような形状精度の向上が強く望まれるようになってきている。

アメリカにおいてレーザ核融合の研究開発がきっかけとなり、多量の高精度軟質金属非球面反射鏡が必要とされるようになった。軟質金属の面あらしを向上させるとともに、形状精度を高めるのは従来のラッピング・ポリシング法によったのでははなはだ困難である。また加工時間がかかり、加工コストも高い。これに代わる方法として、高精度・高剛性の切削加工機械を開発し、構成刃先の生じにくい鋭利なダイヤモンド工具を用いて、切削加工によってこれら部品を得ようとするのが、近時アメリカを中心として飛躍的に進展している。

ここでは、ダイヤモンド工具を用いた超精密切削加工技術について展望を試みたい。アメリカにおける開発の歴史を表1に示す。

### 2. 超精密切削を達成するための条件

形状精度および面あらしを高精度に達成するために、ダイヤモンド切削に必要なとされる諸条件として少なくとも5項目を挙げることができる<sup>(1)</sup>。すなわち、

- (i) ダイヤモンド工具の刃先が鋭利であること
- (ii) 機械運動が正確であること

- (iii) 振動の影響がないこと
  - (iv) 動バランスを十分にとること
  - (v) 温度制御に留意すること
- などが基本的なことである。

(i) ダイヤモンド工具は、高速度鋼、超硬合金、セラミックなどの他種切削工具材料に比べて、刃先が鋭利であって75 nmまでの切込みを与えることができ、工作機械精度を加工物上に転写再生することが可能である。さらに、加工物との間の摩擦力が小さく、ほとんど工具摩耗を生じないし、構成刃先も発生しないので、超精密切削が達成されるようになった<sup>(2)</sup>。しかし、構成刃先を生じないで切削できる材料はかぎられていて、現在、金、銅、銀、黄銅、アルミニウム、ゲルマニウム、シリコン、無電解ニッケル、鉛、モネル、りん酸化カリウムのような塩類、塩化ナトリウム、塩化カリウム、およびある種のプラスチック類(メタクリル樹脂、ポリエチレン樹脂、ポリスチレン樹脂など)はダイヤモンド切削できるが、鋼、チタン、モリブデン、ガラスなどの加工は難しい。工具整形のとき、結晶方位の選択や、先端のみがき方などがたいせつであって、好結果を与えるダイヤモンド工具メーカーはかぎられているようである。

(ii) 機械精度が加工物上に正しく再生されるという意味で、機械運動の正確さは重要である。回転運動の基礎となるスピンドルおよび直線運動の基本となるスライド機構の精度向上に関して、長い期間にわたって多大の努力が払われてきた。スピンドル運動については古くから検討が行われている<sup>(3)</sup>。Union Carbide社が最初に開発した超精密半球旋盤に、はじめて空気軸受スピンドルが用いられ<sup>(4)</sup>、その構造を図1に示す。多孔質グラファイト製パッドを用いているのが特徴である。その後 Moore Special Tool社で開発したダイヤモンド切削加工機では、測定機ベースに図

\* 正員、埼玉大学工学部 (〒333 浦和市下大久保255)。

表 1 アメリカにおける超精密ダイヤモンド切削加工機械開発の歴史

	1960	1965	1970	1975	1980
研 究 機 関	Union Carbide Y-12	○ duPont No. 1	○ duPont No. 2	○ duPont No. 3	○ Multi-faceted Ex-Cell-O Mirror
	Lawrence Livermore (National) Laboratory	-----  Microinch Machining			
	DoE Pacific Northwest Laboratory	-----  Spindle Accuracy			
	Polaroid			○ Moore No. 1 (Oil shower)	○ Moore No. 2 (Oil shower) ○ Moore No. 3 (Laser Interferometer)
機 械 メーカー	Naval Weapons Center Michelson Laboratory				○ Omega X Nanometer
	Rockwell International				○ Bonnie
	Moore Special Tool		△ Union Carbide	△ LLL	△ Bell & Howell LLL
	Pneumo Precision				○ Micro Surface Generator
部 品 メーカー	Ex-Cell-O				△ LASL
	Perkin Elmer				△ Union Carbide
	Honeywell				● Pneumo 1-axis
	Bell and Howell		● No-1		● Pneumo 2-axis
American Optical				● Senior (Moore)	● Sales

○機械開発, △機械納入, ●機械設置

2に示すような空気軸受スピンドルが用いられた<sup>(5)</sup>。Ex-Cell-O社で、大径加工物切削用に開発した立て形旋盤では、図3に示すようなロータリ形空気軸受スピンドルが用いられている<sup>(6)</sup>。

最近 Moore Special Tool 社をはじめとする各種超精密切削加工機に広く用いられている空気軸受スピンドルに、Professional Instruments 社製のものがある。外観図と構造原理は図4に示すとおり、給気孔に絞りを設けず、軸または軸受面に軸方向に多数のみぞが設けられており、送り込まれた気体はそのみぞによって円周方向に一定の圧力に保たれ、軸が偏心したとき上下面に圧力差を生じ、軸受剛性を得るようにしたものである<sup>(7)</sup>。軸受すきまを数 $\mu\text{m}$ にとり、きわめて高い剛性の軸受が得られている。

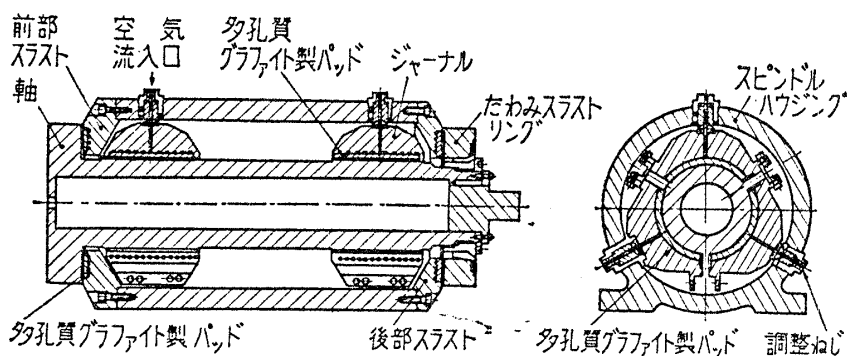


図1 超精密半球旋盤 (du Pont 1号機) に用いられた空気軸受スピンドル

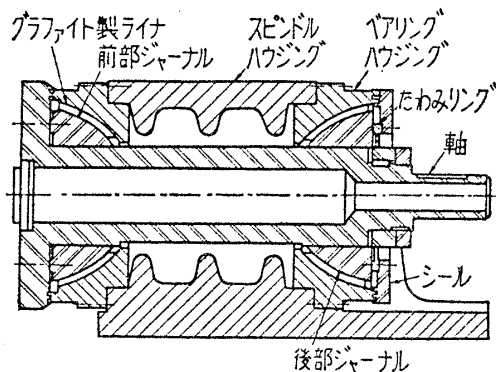


図2 Moore Special Tool 社超精密旋盤に用いられた空気軸受スピンドル

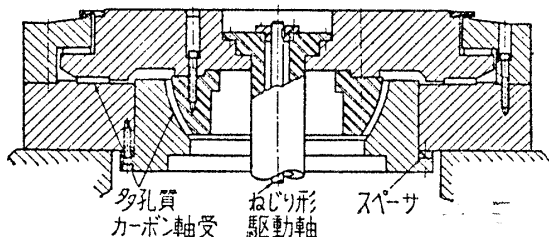


図3 Ex-Cell-O 社立て軸旋盤に用いられたロータリ空気軸受テーブル

大径加工物が切削加工されるような機械も多種製作されるようになり、たとえば径 1.5 m ぐらいの加工物回転用スピンドルとしては、静圧流体軸受が用いられることもある。いずれにしても、スピンドルは回転ふれまわり、軸受剛性などの点でほぼ満足すべき諸元に到達しているように思われる。

スライド機構として、動圧流体、ローラ、静圧流体、静圧気体軸受のいずれを用いるのがよいのか<sup>(2)</sup>、いろいろの会社の製品で使い分けられている。またスライド駆動方式として、ボールねじ、角ねじ、リニアモータ、摩擦駆動、油圧シリンダ、などがいろいろに使われている。移動量の測定システム、Abbe の原理からの偏り、荷重移動に基づく変位などを勘案してスライド機構の実現を図

らなければならない。特にスライドの直線性の精度向上を図ることが現在の急務のように思われる。Lawrence Livermore Laboratory (LLL) では、1 m の移動量に対して、くり返し精度  $0.01 \mu\text{m}$  の真直度を達成しようとしているが、これがおそらく現在指向されている最高精度であろう。

このほか、制御システムについても、いちだんと精度向上を図らなくてはならないであろうし、加工物のチャッキング方式などについても十分に考慮することが必要である。

(iii) 工作機械自身から発生する振動、または外部から伝達される振動によって、得られる加工面あらさが悪くなるので、振動原因の追究および振動除去対策はたいせつである。もっとも大きな要因は、スピンドルおよびスピンドル駆動用モータのアンバランスであり、モータを分離して、固有振動数の低いコイルばねで支持した台に取り付けるのがよい。

つぎに影響の大きいのは、オイルシャワー方式において(後述)、シャワー状に注がれるオイルの衝突に基づく振動である。建物の振動、音圧に基づく振動の影響もかなりある。このほか、スピンドル駆動用ベルトの不均一さとばたつき、外部振動絶縁装置の自励振動、気体軸受や流体軸受の膜の自励振動、静圧流体軸受作動用供給油の脈動、ステッピングモータの振動、切削抵抗変動に伴う

びり振動、工作機械結合部のゆるみなど考えなければならぬ原因がたくさんあるので、一つ一つ対策を立てることが必要である。外部振動の除去には、ふつう空気系振動絶縁装置が用いられ、自動水平調整が行えるようになっている。現在 LLL で建設中のダイヤモンド旋盤は、径 2100 mm, 4500 kg までの加工物が切削加工できるものであるが、8.1×6.4×2.1 m のピットの底に、6.4×4.6×1.5 m, 重さ 80 t のグラナイト定盤を

おき、その上に据え付けるようにされている<sup>(8)</sup>。

(iv) 動バランスを十分にとるために、スピンドル自身、加工物取付け面板について、個々に動バランスをとるとともに、組み立てた状態でも動バランスの確保につとめ、0.05 μm 以内の値に収まるようにすることが望ましい<sup>(1)</sup>。スピンドルにダイヤモンド工具を取り付け、フライカッティング方式で切削する場合にも、当然のことながら同じ配慮が必要である。

(v) 温度制御のために、オイルシャワー方式が開発され、発表されたのは 1972 年のことであった<sup>(9)</sup>。図 5 に示すとおり、作動中に上昇した油温を熱交換機をとおし、ソレノイド弁のオン・オフ制御によって  $20 \pm 0.006^\circ\text{C}$  にしたものを、圧力 0.28 MPa, 流量 150 l/min の割合で、プラスチックカバーの中でシャワー状に、加工物・工作機械に注ぎかけるようにしたものである。この方式の採用により加工精度向上に大きな寄与がなされた。そのため各所で利用されている。LLL で建設中の第 3 号機では、 $\pm 0.0025^\circ\text{C}$  に制御した油を 1.5 m<sup>3</sup>/min の割合で注ぐよう計画が進められている<sup>(8)</sup>。

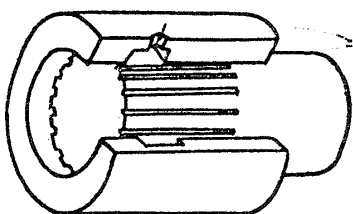
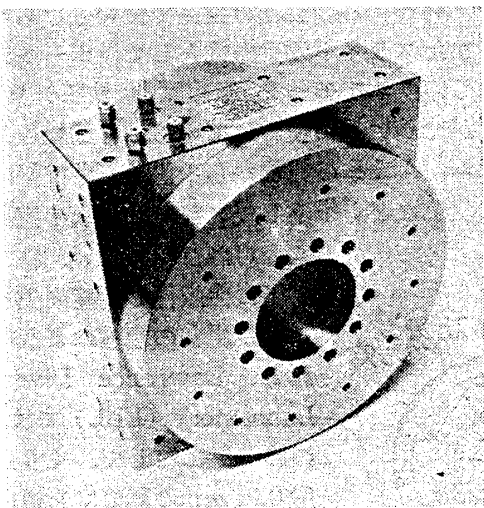


図 4 Professional Instruments 社表面絞り形空気軸受

### 3. 超精密ダイヤモンド切削加工機の数例

Moore Special Tool 社によって、精密測定機 3 形のコラムと垂直スピンドルとを除き、空気軸受スピンドルを水平に取り付けたダイヤモンド鏡面切削加工機が完成したのは 1968 年のことである<sup>(1)(10)(11)</sup>。図 6 に示す構造であって、スライド

面のスピンドル軸に垂直方向の移動距離は約 460 mm, スピンドル軸に平行方向の移動距離は約 280 mm にとられている。これらのスライド面は、複列 V 構造で油潤滑されており、全長にわたって 0.5 μm 以内の直線度におさめられている。スライド送りねじ精度は 25 mm あたり 0.1 μm 以内、全長にわたって 0.5 μm 以内である。空気軸受スピンドルのラジアル回転精度およびスラスト精度はいずれも 25 nm 以内である。またスピンドル軸とスライド移動との平行度は、0.05 μm 以内に収められている。

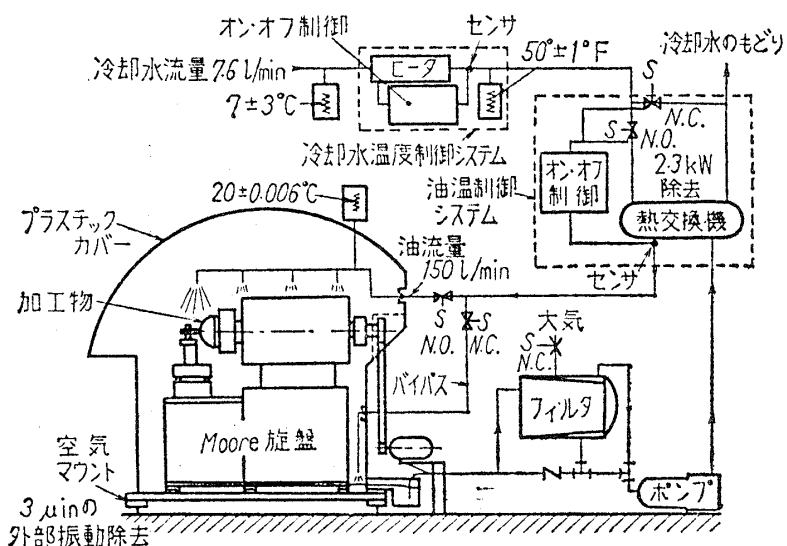


図 5 Lawrence Livermore Laboratory におけるオイルシャワー方式

同社は最近 M-18-AG 形という NC つき超精密非球面創成ダイヤモンド切削加工機 (図7) を商品化した。この機械はレーザ測定機を備え、その測定値がフィードバックされる。スピンドル軸に垂直方向 (X軸) の移動量約 410 mm, スピンドル軸に平行方向 (Z軸) の移動量約 230 mm, X軸およびZ軸で形成する水平面に垂直な軸 (B軸) のまわりの回転運動の分解能 1.3 arc sec である。B軸ロータリテーブルを用いたときの加工物最大径は 356 mm, 取り除いたときは 610 mm となる。機械精度として, X-Z スライドの直線度はそれぞれ全移動量に対して  $0.5 \mu\text{m}$  以内, X-Z 軸の直角度は 1 arc sec 以内, XおよびZ軸移動の位置ぎめ精度は全長にわたって  $1 \mu\text{m}$ ,

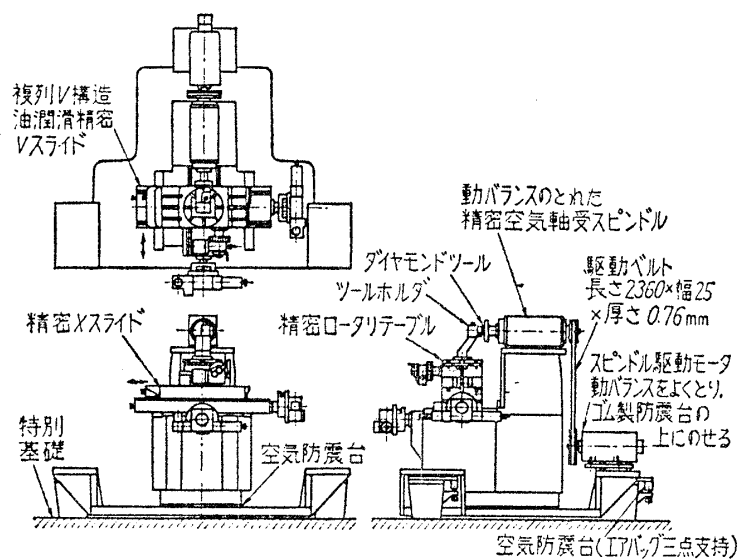


図6 Moore Special Tool 社ダイヤモンド鏡面切削加工機

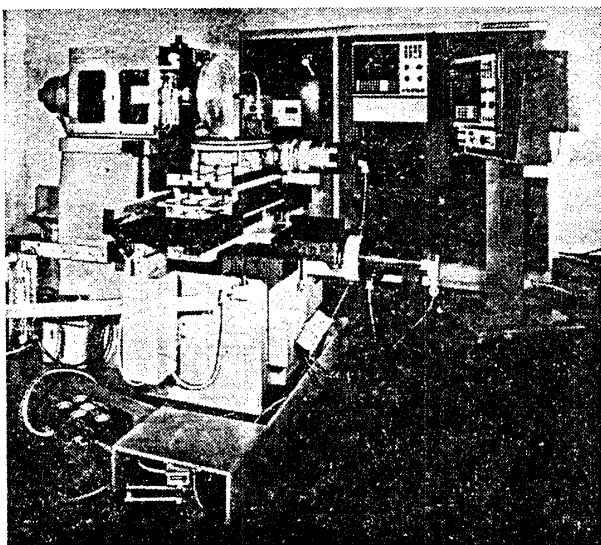


図7 Moore Special Tool 社超精密非球面創成ダイヤモンド切削加工機 (M-18-AG 形)

どの  $25 \text{ mm}$  についても  $0.5 \mu\text{m}$ , B軸の位置ぎめ精度は  $360^\circ$  全体にわたって  $0.38 \mu\text{m}$  以内といわれている。またスピンドルは前述 PI 社製のものであって, ラジアルおよびスラスト精度はそれぞれ  $0.08 \mu\text{m}$  および  $0.05 \mu\text{m}$  とされている。タービン駆動 40 000 rpm ジグ研削用ヘッドを取り付けて, 金属やガラスの研削ができる。

Pneumo Precision 社は, ダイヤモンド鏡面切削加工機を専門に製造している会社であって, 非球面創成用二軸制御 MSG-325, 平面加工用フライカッティング方式 MSG-500, 直径 355 mm の加工物正面切削用 MSG-700 など, 各種の機械を商品化しており, 前述 M-18-AG 形とともにヨーロッパも含めて広く使われている。MSG-325

形は図8に示すようなもので, 直径 300 mm までの非鉄金属やプラスチックを光学レベルの加工面あらしに切削加工することができる。CNC 制御の分解能は  $25 \text{ nm}$  であって, レーザ干渉計による測定値が閉回路でフィードバックされ, 形状精度の高い平面, 円筒, 非球面などが創成される。スピンドルのラジアルおよびスラスト精度は  $0.1 \mu\text{m}$  で, 回転数は  $100 \sim 2400 \text{ rpm}$  の間可変である。二軸制御で径 150 mm, 曲率半径 500 mm の反射鏡を切削したとき, 面あらし  $0.1 \mu\text{m}$ , 形状精度  $0.5 \mu\text{m}$  が得られる。また一軸で正面切削したとき 150 mm 径の平面鏡に対し, 平面度  $0.25 \mu\text{m}$ , 面あらし  $0.05 \mu\text{m}$  という。

アメリカ空軍兵器研究所が Union Carbide 社と契約をして, 直径 800 mm



図8 Pneumo Precision 社非球面創成用二軸制御旋盤 (MSG-325 形)

非球面光学部品を、 $0.1\ \mu\text{m}$  精度で加工できる技術の開発プロジェクトが進められている<sup>(12)</sup>。このプロジェクトは、POMA (Point One Micrometer Accuracy) と呼ばれており、表 2 に示すように、各誤差要因の到達目標誤差を設定し、制御システム、機械上での計測法、誤差補償法、加工物の支持方法などの開発が進められている。その概念図を図 9 に示す。

LLL では種々の新しい着想を織り込みながら、直径  $2.1\ \text{m}$  の加工物が高精度で加工できる機械の開発にとりくんでいる<sup>(9)</sup>。外観図は図 10 に示すようなもので、切削加工ばかりでなく、研削やポリッシングもでき、機械上で計測もできるよう設計されている。

このように、アメリカでは政府エネルギー局を中心とするレーザ核融合プロジェクト、あるいは陸海空軍における製造技術開発プログラムなどを通じて、高精度ダイヤモンド切削加工機の開発

表 2 POMA における誤差分配

誤差要因	現状 誤差推定 $\mu\text{m}$	到達 目標誤差 $\mu\text{m}$
1. スライドの位置測定	0.1	0.01
2. スライドの位置制御	0.5	0.05
3. ヨー、ピッチ、ロール	1.0	0.02
4. スライドの直線性	0.25	0.02
5. スピンドルの半径ふれまわり	0.1	0.02
6. スピンドルの軸方向ふれ	0.1	0.02
7. スピンドル growth	0.25	0.05
8. スピンドル駆動	0.05	0.01
9. 熱変形	0.5	0.05
10. 加工物の支持	0.5	0.05
計	~1.5	~0.1

$150\ \text{mm}$  径の部品に対しては、誤差要因 2, 9, 10 は減るので、総合誤差は  $\sim 0.07\ \mu\text{m}$  になるであろう。

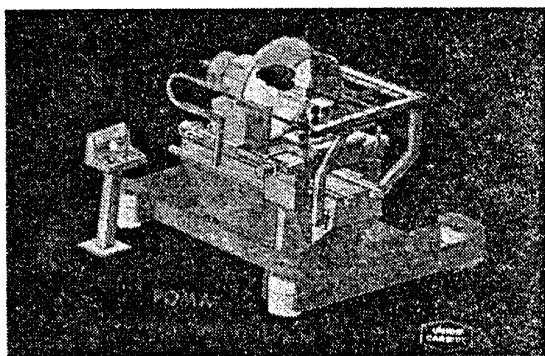


図 9 POMA で開発するダイヤモンド旋盤 (Union Carbide 社)

に、多くの資金と人員とが投入されている。これからの製造技術の基礎であり、推進力となるのが超精密切削加工技術であるという思想が、政府や軍の関係者に浸透していることをよく認識する必要がある。また最近これに関係するアメリカの機械メーカを数社訪問したおり、超精密切削加工機械はマザーマシンであり、その製作にあたっては最高の技術と知識を導入するとともに、最高レベルの技能の限界に挑戦する姿に強い感銘をうけた。あらゆる技術的可能性を追究するとともに、より高度の技能を育成しないと、超精密機械のハードの実現は難しいのではないだろうか。

#### 4. ダイヤモンド切削加工の特徴と適用分野

ダイヤモンド切削加工における利点をいろいろと挙げる事ができる。

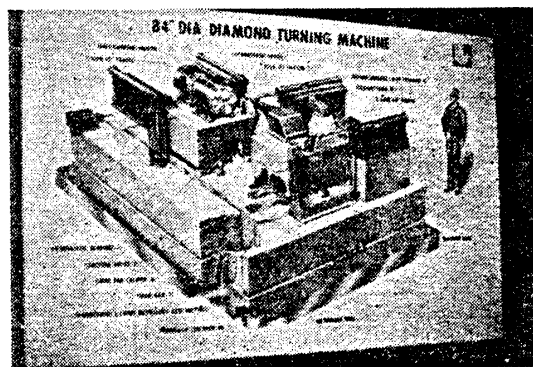


図 10 84 in 径 (2.1 m) ダイヤモンド旋盤 (Lawrence Livermore Laboratory)

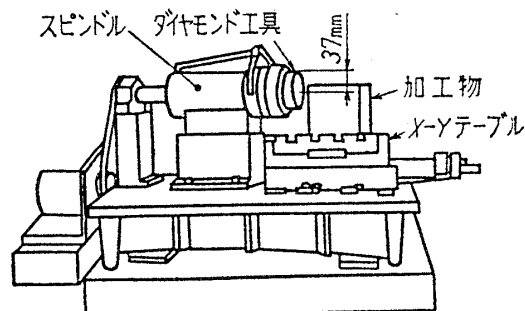
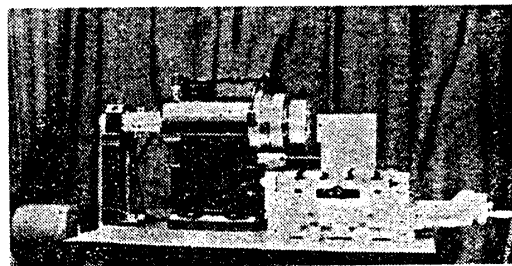


図 11 ダイヤモンド切削加工実験装置 (埼玉大学)

(1) 加工面あらかさがすぐれている 図 11 に示す装置<sup>(13)</sup>を用い、フライカッティング方式で無酸素銅およびメタクリル樹脂の切削を行ったところ、もっとも良い面として  $5 \text{ nm } R_{\max}$  の切削面あらかさが得られた。スピンドル回転精度のすぐれたものと、鋭い刃先のダイヤモンド工具を用いれば、比較的容易に  $0.01 \mu\text{m } R_{\max}$  程度の面あらかさが得られる。アメリカ海軍兵器センターの報告によれば、径  $150 \text{ mm}$  以下の平面鏡に対して  $4 \text{ nm, rms}$  の値を得ている。曲面鏡では  $5 \sim 10 \text{ nm, rms}$ 、 $150 \text{ mm}$  以上  $2000 \text{ mm}$  径の反射鏡については  $18 \text{ nm, rms}$  という値が発表されている<sup>(14)</sup>。

(2) 加工精度がすぐれている 加工面あらかさはともかく、大径寸法の非球面反射鏡を高精度で加工するのはかなり難しい。Moore Special Tool 社製ダイヤモンド旋盤を用いて切削した場合、直径  $640 \text{ mm}$  までの平面鏡に対して  $2 \text{ nm/mm}$ 、曲面鏡に対して  $3 \text{ nm/mm}$  という形状精度の値が得られている<sup>(15)</sup>。軟質金属反射鏡の製作にあたって、ポリシングによったのでは面あらかさと形状精度を同時に高めるのは難しく、高精度・高剛性機械を用いたダイヤモンド切削の優位性が認められる。

(3) 加工コストが安い Honeywell 社はアメリカ空軍材料研究所との契約に基づいて種々検討を行い、赤外領域における観察系に用いられる反射および屈折光学部品の加工に、ダイヤモンド切削を適用することによって、加工費低減に役立つことが大きいことを明らかにした<sup>(16)</sup>(表 3)。なおこのほかにも、 $100 \text{ mm}$  径放物面鏡について、形状精度  $3 \mu\text{m}$  のものを作るのに従来方法では 12 箇月、 $50000$  ドルかかっていたものを、ダイヤモ

ンド切削によってわずか 3 週間、 $4000$  ドルになり、しかも形状精度  $0.6 \mu\text{m}$  のものが得られている<sup>(12)</sup>。

(4) その他 同一材料について、ポリシ面、スパッタ面、蒸着面、ダイヤモンド切削面を作って各種波長における反射率を比較したところ、ダイヤモンド切削面がもっとも反射率が高く、材料固有の値に近いことが見いだされた<sup>(17)</sup>。

ダイヤモンド切削された面は、被覆したり、面を保護しなくても、安定して長いこと変わることがない。

金属反射鏡にレーザ照射することにより、表面損傷をうけるが、ポリシ面に比べてダイヤモンド切削面のほうがレーザ損傷をうけるしきい値が高い。

このように数多くの利点があるので、ダイヤモンド切削加工法は、レーザ核融合装置の反射鏡として使われるようになった。このほか、赤外領域における各種計測システム、極端紫外部や X 線領域における天体望遠鏡などに用いられる光学部品の製造に適用されだしている(イギリスの Cranfield Unit for Precision Engineering で建設中のダイヤモンド切削加工機も、X 線天体望遠鏡の部品加工用であるという)。さらにレーザスキャナ、レーザプリンタなど、レーザ応用情報処理関係で多く用いられる多面体鏡を、ダイヤモンド切削によって従来方法に比べて、安く早くできることが期待され、多くのところでその適用の計画を進め、一部実用化しだしている。

ダイヤモンド切削加工はすぐれた超精密加工技術の一つであって、その適用範囲は拡大するであろうである。アメリカで 1974 年にはじめて光学

表 3 ダイヤモンド切削によるコスト低減 (Honeywell 社)

光学システム	1組あたりコスト ドル		必要セット数	予想期間	コスト低減額 万ドル
	従来法	ダイヤモンド切削法			
D-5 回転鏡	4000	1600	300	1977~1980	72
D-5 放物面鏡	3900	1800	300	1977~1980	63
D-5 平面鏡 (4組)	1600	900	300	1977~1980	21
Q-9 非球面鏡*	3500	2000	546	1977~1982	81.9
暗視野非面鏡 (2組)	4000	2000	未定		
RPV FLIR 非球面鏡 (3組)	1600	900	2000	1980~1985	140
医用・特殊 FLIR*	3500	2000	100	1978~1985	15
			合計		392.9

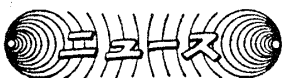
\* 4枚のレンズを2個の非球面鏡に置換。

部品の超精密加工のセミナーが開かれてから、毎年のようにセミナーが開催され、相互の知識交流ばかりでなく、政府や軍の関係者、あるいは物理学者や天文学者にいたるまで理解を深め、関心を集めて、ニーズを拡大していった努力に学ぶ必要がある。最近では1981年5月にはイギリスで開催され、1982年6月にアメリカで開催の準備が進められている。

(原稿受付 昭和56年8月4日)

### 文 献

- (1) Warmbrod, W.M., *SME Technical Paper*, MR 72-613 (1972).
- (2) Bryan, J.B., *1st Int. Precision Engineering Seminar*, (1981-5); *Special Lecture*, (1981-6).
- (3) Bryan, J.B., ほか2名, *Am. Mach.*, 111-25 (1967-12), 149.
- (4) Whitten, L.G. and Lewis, T.G., *Proc. 7th Int. MTDR Conf.*, (1966-9), 491.
- (5) Rasnick, W.H., ほか3名, *SME Technical Report*, MRR 74-02 (1974).
- (6) Jessup, J.L., *SPIE*, 93 (1976), 136.
- (7) 特許 595585 (昭 45-7-20 公告) および 623945 (昭 46-4-1 公告).
- (8) Bryan, J.B., *Precision Eng.*, 1-1 (1979), 13.
- (9) Bryan, J.B., ほか3名, *SME Technical Paper*, MR 72-138 (1972).
- (10) Arnold, J.B. and Steger, P.J., *SME Technical Paper*, MR 74-943 (1974).
- (11) Williams, R.L. and Warmbrod, W.M., *Cutting Tool Eng.*, (1973-Nov./Dec.).
- (12) Saito, T.T., *Optical Eng.*, 17-6 (1978-Nov./Dec.), 570.
- (13) Kobayashi, A., *SME Technical Paper*, MR 80-214 (1980).
- (14) Decker, D.L. and Cram, R.E., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, (1976).
- (15) Arnold, J.B., ほか4名, *SPIE*, 93 (1976), 2.
- (16) Johnson, F.E., *SPIE*, 93 (1976), 104.
- (17) Olson, V.F. and Lisalda, J.W., *SPIE*, 159 (1978), 103.



### 文部省科学研究費補助金交付先決定 (その 18)

(前月号より)

【一般研究B・金属工学】(単位 万円)

▽強磁界任意温度 (名大 安達健五) 50, ▽鉄鉍石ペレット還元用プラント (阪大 近江宗一) 60, ▽MoとMo合金の熱間延性 (東北大 後藤 一) 50, ▽高純度鉄中の原子空孔 (東北大 木村 宏) 80, ▽非晶質合金の超高压圧縮 (東北大 岩崎 博) 60, ▽マルテンサイト単結晶の物性 (筑波大 大塚和弘) 80, ▽相分離過程 (九大 江口鉄男) 250, ▽熔融スラグの熱物性 (阪大 荻野和己) 160, ▽異形断面材の押出し (東北大 高橋裕男) 70, ▽アルミニウム板の製造法 (横浜国大 上城太一) 80, ▽合金融液内での柱状晶の成長 (阪大 岡本 平) 100, ▽金属間化合物熱疲労 (北大 渡辺勝也) 80, ▽材料開発 (東北大 辛島誠一) 80, ▽非磁性鋼の疲労特性 (東大 藤田利夫) 160, ▽液体急冷鉄合金のスピンノーダル分解 (名工大 宮崎亨) 30, ▽溶接部材の高速変形 (東北大 島田平八) 340, ▽母板溶込み保証方法 (阪大 仲田周次) 280, ▽異種金属の摩擦圧接 (慶大 蓮井 淳) 270, ▽亜鉛電解採取 (東北大 戸沢一光) 70, ▽ユークスの選択反応性 (東大 館 充) 60, ▽液体金属中吹込みガスジェット (名大 森 一美) 180, ▽複雑硫化精鉍 (名

大 沖 猛雄) 50, ▽異常黒鉛組織 (早大 堤 信久) 180, ▽オーステナイトステンレス鋼 (東大 久松敬弘) 50, ▽アルミニウム複合拡散皮膜 (早大 上田重朋) 70, ▽鋼のマルテンサイト (東大 井野博満) 410, ▽電界イオン顕微鏡型アトムプローブ質量分析器 (東工大 西川 治) 700, ▽高分解能多波格子像法 (京大 吉田博行) 720, ▽バルクハウゼン雑音解析法 (東北大 本間基文) 450, ▽素材温度の測定 (名大 戸沢康寿) 890, ▽超電導材料の凝固過程 (東海大 楯山正孝) 690, ▽スピノーダル分解型強磁性合金 (東北大 西沢泰二) 780, ▽超硬合金の機械的性質 (東大 鈴木 寿) 920, ▽耐火金属繊維強化型超耐熱複合材料 (豊橋技科大 湯川夏夫) 880, ▽合金鋼の除冷組織 (法政大 渡辺 敏) 640, ▽ステンレス鋼溶接金属 (名大 篠田剛) 930, ▽鋼の粒界破壊現象 (阪大 中尾嘉邦) 810, ▽熱処理を兼ねる溶接技術 (芝浦工大 橋本達哉) 750, ▽スラガーメタル界面 (東北大 萬谷志郎) 750, ▽鋼中酸化物系介在物 (名大 板尾 弘) 410, ▽強電解質水溶液 (京大 眞嶋 宏) 310, ▽低炭素鋼の加工 (東大 阿部秀夫) 780, ▽ステンレス鋼の粒界腐食 (北大 西田恵三) 640. (255 ページへつづく)

【服部 敏夫】