

解説

最近の非球面加工技術

野村 和 司

(株)ニコン相模原製作所レンズ部第2技術開発課 〒228 相模原市麻溝台 1-10-1

(1992年10月13日受理)

On Recent Manufacturing Technology of Aspherical Optics

Kazushi NOMURA

2nd Research & Development Sec., Lens Division, Sagamihara Plant, NIKON Corp.,
1-10-1, Asamizodai, Sagamihara 228

1. ま え が き

非球面光学素子の定義をどこまで推し広げて捉えるかは明確ではないが、円筒面や円錐面等を含めず非球面式により表される2次・高次の非球面とした場合、生産され始めたのは1940年代頃と思われる。

当初は天体望遠鏡や特殊コンデンサーレンズ等に用いられてきた。その形状は主にシュミットプレートや放物面・双曲面形状であり、加工技術や計測技術においては、古典的な手法により取り組まれていた。

例えば研削加工においては、カーブゼネレータによる近似球面研削加工やならい研削加工であり、研磨加工においては、ゾーン研磨加工(図1)やハンドポリッシングであった。また形状計測では、ロンキーテスト等が利用された(図2)。特に研磨加工においては、熟練を要し経験や勘を頼りにしていた。

しかし1960年代頃より米国を中心として、主に軍需、宇宙等特殊分野の光学素子開発を目的に、運動精度の転写という母性原理を適用した超精密加工技術が研究開発されるようになり、また計測技術の向上とともに非球面光学素子は、作業者の技能ではなく工作機械を主とした加工技術により製作されるようになってきた¹⁾。

超精密加工技術により製作される非球面光学素子も、現在ではカメラレンズを始め磁気ディスク基板やレーザープリンター用ポリゴンミラー・f- θ レンズのようなエレクトロニクス分野におけるデバイスとして利用されてきている。これら民生分野では、量産性の向上を図りながら高精度化への技術開発が進んでいる。一般にこの

分野においては、機械的除去加工法ではなく、プレス法やモールド法による大量生産へと向かうと思われる²⁾。

しかし、宇宙分野や半導体製造装置分野のような超ハイテク分野においては、超高精度・大口径非球面光学素子の需要が増大している。このような超高精度大口径非球面光学素子に必要とされる精度は、カメラレンズ等の十数倍が要求される。しかしこれらに対する要素技術開発は、いまだ十分な成果をあげておらず、種々の技術課題が蓄積している状況である。

そこで、今日取り組まれている大口径光学素子に対する超精密加工技術とその加工例について述べるとともに、今後の非球面加工技術の展望について概説したい。

2. 非球面光学素子の超精密加工技術

2.1 切削加工技術

超精密加工が研究開発された最初の加工方法は、単結晶ダイヤモンド工具を用いた切削加工技術であった。最初に商品化された超精密加工機は、空気静圧軸受を使用したターニングおよびフライカット式切削加工機であり、磁気ディスクやポリゴンミラーの加工が行われた³⁾。

加工精度の向上を図るためには、機械の運動精度や高剛性化といった加工機の精度向上、恒温化や振動対策等の環境対策が必須となる⁴⁻⁶⁾。その他に、被加工物である材料の結晶粒界や介在物・格子欠陥等の存在が加工面に及ぼす影響も無視できない⁷⁾。

また、工具として用いられるダイヤモンドバイトの精度・寿命も加工精度を支配する要因の一つとなる。特に軸対称非球面光学素子をX-Z同時2軸制御方式により

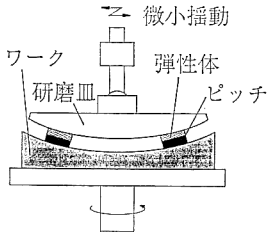


図1 ゾーン研磨加工法 (輪帯研磨)

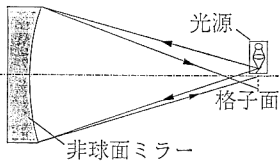


図2 ロンキーテスト法

ターニングする場合には、工具の先端 R 精度が加工物の形状精度に大きく影響を与える。よって、単結晶ダイヤモンドバイトの形状精度を向上させる研究が種々の方法により試みられている⁸⁾。また、大口径光学素子の加工において最も問題になるのがバイト寿命である。筆者らの経験では、 $\phi 550\text{ mm}$ の無酸素銅ミラーの切削において、数回の切削加工により、チッピングや摩滅が生じてしまい、表面粗さの劣化を防ぐことができなかった。

図3に超精密切削加工機のシステム構成図を示す。X軸・Y軸のスライドテーブルおよびワークスピンドルには、空気静圧軸受を使用している。また、位置制御にはレーザー干渉測長器を用いている。ワーク最大加工径は、 $\phi 550\text{ mm}$ であり、大口径光学素子の加工が可能である。形状測定ユニットを取り付けることにより、オンマシン計測も可能となる。図4は本加工機によりダイヤモンド切削を行ったゲルマニウムの切削面の干渉縞写真である。表面粗さは、約 3 nm rms を得ている(図5)。

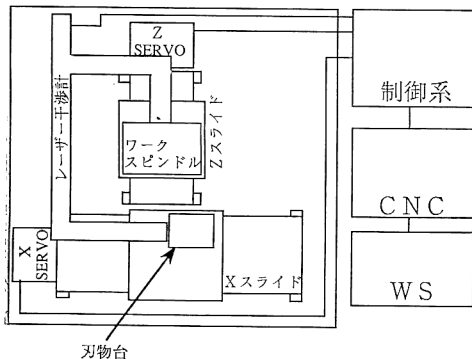


図3 超精密切削加工機のシステム構成

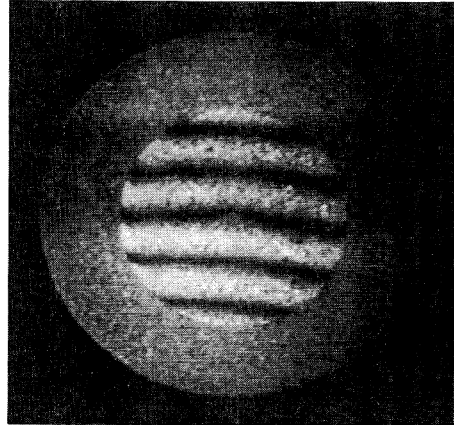


図4 ゲルマニウム切削面の干渉縞写真

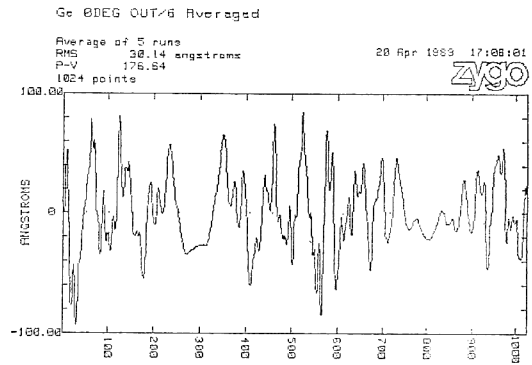


図5 ゲルマニウム切削面の表面粗さ

表1 切削条件

ワーク形状	$\phi 60\text{ mm} \times t 15\text{ mm}$
送り速度	2 mm/min
切り込み量	$1\ \mu\text{m}$
ワーク回転数	1500 rpm
バイト先端R	5 mm

その時の切削条件を表1に示す。

2.2 研削加工技術

研削加工においても、切削加工と同様に機械の運動精度の転写により加工が進行する。一般に、光学ガラスを代表とする脆性材料の超精密加工は、研削加工により光学レンズとしての仕様を満たす形状精度を得、仕上げ面を鏡面化することで、その後の研磨加工の負担を軽減する手法が用いられている^{9,10)}。この手法は、精研削軽研磨法とも呼ばれ、非球面レンズの量産工程に適した手法の一つと思われる。しかし最近では、種々の方法にて研削加工により得られる仕上げ面に匹敵する表面粗さを達

成する研究成果が報告されている。

研削砥石に電解を掛けながら目立てを行うことにより、鏡面を得る電解インプロセスドレッシング法 (ELID 研削) が開発されている。最近の報告では、門型マシンングセンターにより #4000~#8000 鑄鉄ファイバボンダイヤモンド砥石により、光学ガラス BK-7 を ELID 研削することで、表面粗さ R_{max} 43 nm, 形状精度 1 μ m の非球面加工が可能とのことである¹¹⁾。

また難波らは、研削スピンドルに低熱膨張ガラスセラミックスを使用し熱剛性を高めるとともに、回転精度、剛性、吸振性を高めた超精密平面研削盤を開発している。この装置を用いて、レーザーガラス LHG-8 を研削加工し、表面粗さ 0.55 nmrms を得ている¹²⁾。

これら開発例は、まさに研削加工により、研磨面に匹敵する加工面を得るための手法であり、今後の大口径レンズへの適用に期待するところ大である。

2.3 研磨加工技術

研磨加工においては、その除去加工が研磨圧力と工具・被加工物間の相対速度差により主に進行する¹³⁾。よって研削加工や切削加工のように運動精度の転写という考えが直接適用できない。そのため、研磨加工の高精度化を図るには、研磨圧力と工具等の運動速度の高精度な制御が必要不可欠となる。しかし現状では、高精度な研磨圧力の制御は難しく、また非球面の場合には、ポリッシュ面内での圧力分布の均一性を得ることが容易ではないため、高精度な研磨加工が困難な状況となっている。また、研磨剤濃度やポリッシャーの経時変化など研磨条件が安定しにくいことも高精度化を難しくしている要因である。

非球面光学素子の研磨加工については、その発想の違いから、前加工面の形状を崩さないように研磨しようという均等研磨加工技術と、積極的に形状精度を修正していこうというスモールツール修正研磨加工技術とがある。

均等研磨加工技術とは、形状精度は前加工である研削加工や切削加工により創成し、形状を崩さないように表面粗さのみを向上させるために用いられる。ポリッシャーの貼られたゴムに空気圧を加え均一な研磨圧力が加工面に作用するようにした方法等がある¹⁴⁾。

スモールツールによる修正研磨加工とは、研削加工や切削加工では形状創成が不十分であり、さらに研磨加工により形状精度・表面粗さの向上が必要な場合に用いられる。大口径非球面レンズやミラーの研磨加工には、古くからこの手法が用いられている^{15),16)}。

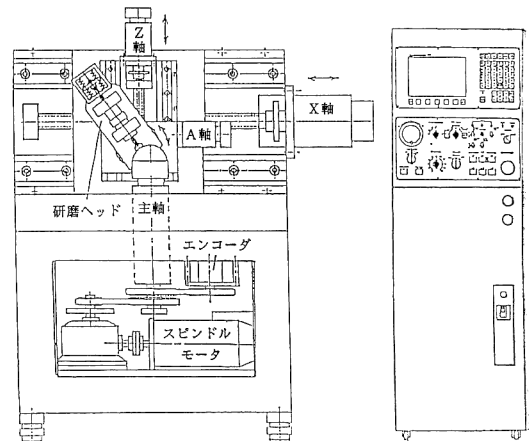


図6 スモールツール研磨機の概略

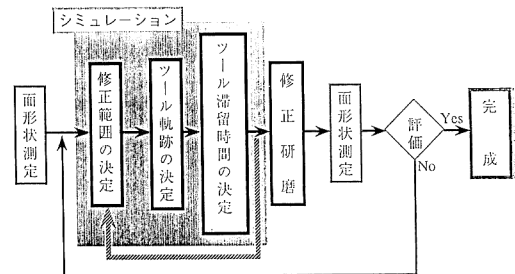


図7 シミュレーションアルゴリズム

図6には、当社にて開発したスモールツール研磨機を示す。構造は、ベース上面にワーク回転テーブルを配し、ツールが X-Y-A 軸によりワーク面に対し常に法線方向を向くように同時3軸制御されている。ワークの最大加工径は、 $\phi 400$ mm である。研磨圧力は、研磨軸部に設置した変位センサーにてレンズ面との変位量を計測し、この変位量をもとに研磨ヘッド部をモーターでボールネジの出し入れを行うことで研磨力制御している¹⁷⁾。

この研磨機には、図7に示すように、シミュレーションによる工具軌跡の算出、NC による DNC 制御、研磨加工が包含されている。サイドマシンにて形状計測を行い、スモールツール研磨加工へのフィードバックを行っている。

3. 非球面光学素子加工例

3.1 シュミットプレートの超精密加工

天体望遠鏡等に使用されるシュミットプレートの超精密加工の試作を行った。シュミット光学系は、カセグレン光学系とともに、光学性能評価が容易であることから、天体望遠鏡等に盛んに適用されてきた。シュミットプレートは、球面ミラーの球面収差を補正するための

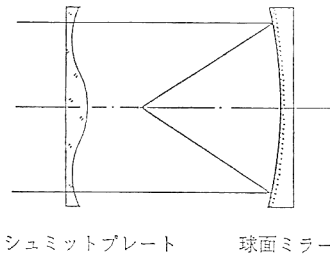


図 8 シュミット光学系

補正レンズであり、図 8 のような形状をしている。一般に平面からの逸脱量が、数十 μm 程度の非球面形状である。

今回試作したシュミットプレートを図 9 に示す。まず、粗研削にて概略形状が得られた後、超精密研削加工機にて非球面加工を行い、形状精度約 $2\mu\text{m}$ を得た（図 10）。その後、修正研磨加工を行い、約 $0.2\mu\text{m}$ の形状精度を達成することができた。図 11 には、透過波面の干渉縞写真を示す。透過波面にて約 $0.1\lambda\text{P-V}$ が得られている。

3.2 CO₂ レーザー用金属ミラーの超精密加工

CO₂ レーザー用ミラーには、一般に高いエネルギーを反射するという用途より、冷却性能に優れた銅やアルミ等の熱伝導率の高い材質が用いられている。

Saito らは、各種軟質金属の超精密切削加工や研磨加工を施したミラーに対して、CO₂ レーザー照射実験を行い、CO₂ レーザー用ミラーに適した加工方法の研究を行っている^{18,19)}。また、江田らは無電解ニッケルの成分

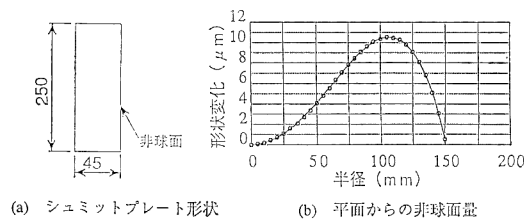


図 9 試作したシュミットプレート

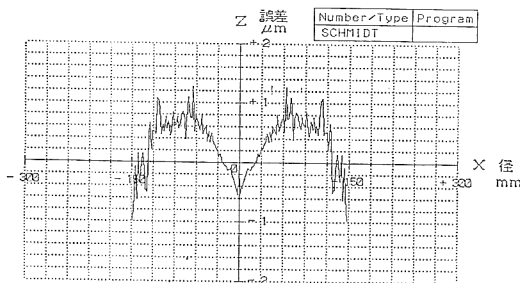


図 10 超精密研削加工後の形状精度

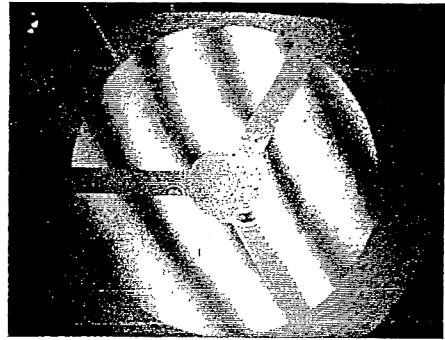


図 11 透過波面の干渉縞写真

を変化させることにより、バイト摩耗量や表面粗さの影響等について研究し最適条件を提案している^{20,21)}。河野・尾中らは、赤外域にて使用する金属ミラーを用いた宇宙赤外望遠鏡 (IRTS) の開発を行っている²²⁾。

今回試作したミラーは、 $\phi 550\text{mm}$ を有する大口径放物面ミラーである。材質は、アルミ合金に無電解ニッケルメッキを施し、ミラー裏面は、冷却のため溝加工を行っている。

図 12 に今回試作した CO₂ レーザー用ミラーの形状を示す。ミラーは前加工を行った後、加工歪を除去するためにアニール処理を施している。その後で超精密切削加工機でアルミ面のダイヤモンドターニングを行い、無電解ニッケルメッキを施している。メッキ面の切削後の形状精度は、 $0.3\mu\text{m}$ 以下を得ることができた。超精密切削の条件を表 2 に示す。図 13 は、ダイヤモンドター

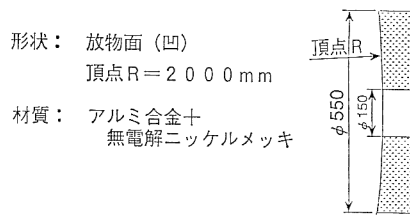


図 12 試作した CO₂ レーザーミラーの形状

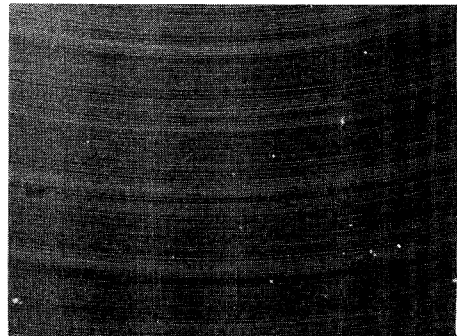


図 13 切削加工面の微分干渉顕微鏡写真

表 2 切削条件

切り込み量	1 μm
送り速度	2 mm/min
ワーク回転数	400 rpm
切削液	白灯油

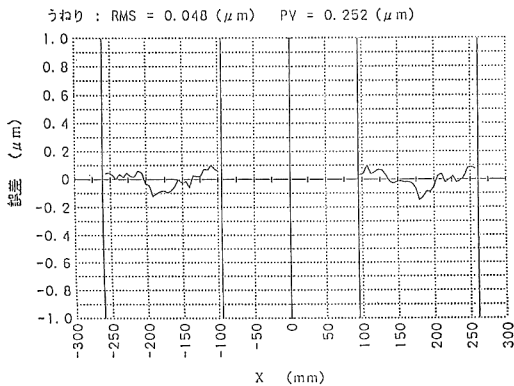


図 14 切削加工後の形状精度

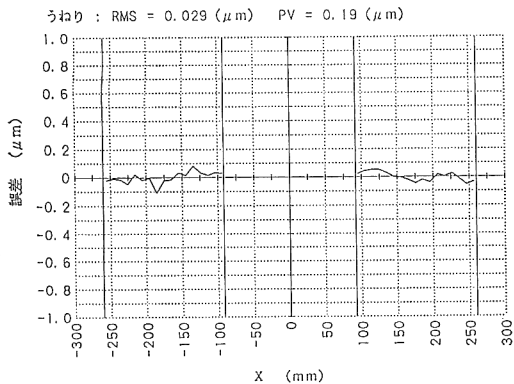


図 15 研磨加工後の形状精度

ニング面の微分干渉顕微鏡写真である。このように、 $\phi 550\text{ mm}$ を有する超精密切削では、数回の切削にてバイト摩耗がかなり増大してしまう。よって、ツールマーク除去のため研磨加工を行っている。

切削加工後の形状精度を図 14 に、研磨加工後の形状精度を図 15 に示す。また、干渉縞写真を図 16 に示す。放物面干渉測定例を図 17 に示す。

4. 大口径非球面光学素子開発の課題

カメラレンズ等の比較的小口径中精度の非球面光学素子の形状計測技術については、機械の運動精度とレーザー干渉測長技術・接触式プローブにより要求仕様を満たす計測技術が確立されている。

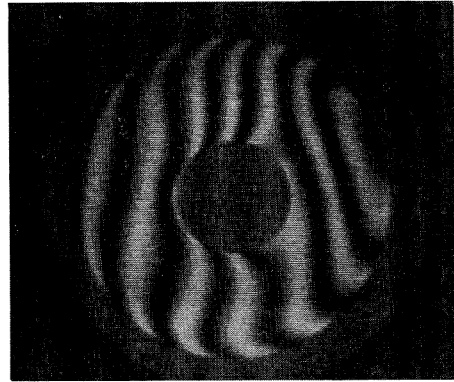
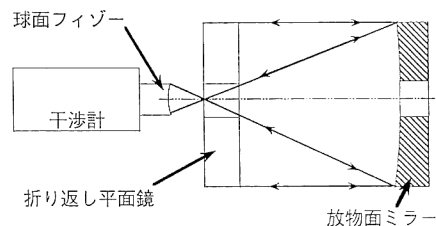
図 16 CO₂ レーザーミラーの干渉縞写真

図 17 放物面ミラーの干渉測定例

しかし、大口径非球面光学素子に対しては、スケールファクターが大きく作用し、同様の計測技術を適用することはコスト的観点からみても困難である。また、大口径光学素子を断面測定にて形状評価を行うことは極めて危険であり、3次元形状による評価技術を開発する必要性がある。

光学素子の姿勢差による変形を考えた場合、直径の約 15% のレンズ中心厚が必要とされている。これを直接 $\phi 500$ のレンズにあてはめるとレンズ中心厚 75 mm が望まれることとなる。このように径に比例して厚くなるレンズの重量を支持し加工するだけの剛性をもたせることが機械製作上大きな技術要因となる。考え方を逆に展開すれば、非常に薄肉レンズとし数百点といった支持点によりアクティブサポートを行う手法やハニカム構造を有する軽量化ミラーの加工技術開発が必要となる。しかしこれもミラーに限っての話である。

現在まで培われてきた超精密加工技術を基に、宇宙用観測機器を始め、ハイビジョン用プロジェクターレンズやステッパー用レンズ等の特殊用途では、非球面量の大きい大口径光学素子の利用が進められている。今までは、大口径光学素子といえば、単品であり量産は考えられなかったが、今後は $\phi 300\text{ mm}$ を越えるようなレンズの量産技術確立が求められると思われる。

超精密加工技術が生かされるもう一つの道は、従来の

加工手段では、得られなかった特殊形状が加工可能となったことである。たとえば、森山らは回転テーブルと円周方向への切り込み量制御により、非軸対称非球面レンズの加工技術を開発している^{23,24)}。また、青木らは、X線集光用ボルター型ミラーの加工技術開発を行っている²⁵⁾。

今後は、自由曲面形状を有する光学素子の製品レベルでの利用が積極的に進められていくと思われる。

5. ま と め

非球面光学素子の最近の加工技術について、特に大口径化・高精度化する非球面光学素子の分野に絞り、思慮のおよぶ範囲で、概説を試みたつもりである。これ以外の加工方法として、モールド法やガラスプレス法、付加工方法等が挙げられるが、これらは他の機会にゆずりたい。また、光学素子の形状としては、より小径なレンズの量産技術の流れが考えられるが、これも解説の主旨と離れるので割愛させていただいた。非球面光学素子の加工技術の裾野は、今後ますます広がりを見せるものと考えられるが、今後とも自由闊達な研究開発が行われ、ますます高精度非球面光学素子が利用されることを期待したい。

文 献

- 1) A. Cox and M.F Royston: Proc. Conference on Optical Instrument and Techniques (1961) p. 330.
- 2) 泉谷徹郎: “非球面レンズの高精度モールドング成形”, 精密工学会誌, **55** (1989) 972.
- 3) 小川秀樹: “非球面加工機とその加工事例”, 精密工学会誌, **36** (1992) 6.
- 4) 伊藤清一, ほか: “微小変位テーブルによる直線運動軸の運動誤差補償”, 精密工学会秋期大会講演論文集 (1991) p. 845.
- 5) 難波義治, ほか: “超精密加工・計測用恒温クリーンルーム”, 精密工学会秋期大会講演論文集 (1991) p. 857.
- 6) 岡沢泰夫, ほか: “超精密加工用 CNC 装置”, 精密工学会秋期大会講演論文集 (1991) p. 861.
- 7) 江田 弘, ほか: “加工材料の精度”, 機械技術, **30**(1982) 44.
- 8) 宮本岩男: “ダイヤモンドバイトのイオンビームによる成形”, 精密工学会誌, **55** (1989) 42.
- 9) 持田省郎, ほか: “多品種対応非球面ガラスレンズ加工システム”, Natl. Tech. Rep., **36** (1990) 172.
- 10) 上田修治, ほか: “非球面ガラスレンズの加工システム”, 砥粒加工学会誌, **36** (1992) 14.
- 11) 大森 整: “球面・非球面レンズの電解インプロセスドレッシング (ELID) 鏡面研削”, 砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (1992) p. 129.
- 12) 難波義治, ほか: “レーザガラスの超精密研削”, 精密工学会秋期大会講演論文集 (1991) p. 69.
- 13) F.W. Preston: “The theory and design of plate glass finishing machines,” J. Soc. Glass Technol., **11** (1927) 214.
- 14) 内藤和雄: “カメラ生産における超精密技術”, 日本機械学会誌, **87** (1984) 66.
- 15) R. Aspden, *et al.*: “Computer assisted optical surfacing,” Appl. Opt., **11** (1972) 2739.
- 16) R.A. Jones, *et al.*: “Rapid fabrication of large aspheric optics,” Proc. SPIE, **571** (1985) 84.
- 17) 草野正明: “プラスチック光学部品の射出成形技術と周辺技術”, 光技術コンタクト, **29** (1991) 687.
- 18) T. T. Saito: “10.6 μm mirror reflectivities,” Proc. SPIE, Metal Optics, **65** (1975) 118.
- 19) T. T. Saito: “10.6 micrometer absorption in molybdenum mirror,” Pap. Am. Inst. Aeronaut. Astronaut., **74** (1974) 1.
- 20) 江田 弘, ほか: “無電解 Ni-P めっきの超精密切削加工”, 精密工学会誌, **53** (1987) 132.
- 21) 江田 弘, ほか: “超精密切削用ダイヤモンド工具の長寿命化”, 精密工学会誌, **55** (1989) 161.
- 22) 尾中 敬, 河野嗣男, ほか: “SFR 搭載用宇宙赤外線望遠鏡 (IRTS) の低温ハルトマンテスト”, 宇宙科学研究報告, **69** (1990) 12.
- 23) 森山茂夫: “硬X線集光用非球面反射鏡の加工に関する研究”, 精密工学会誌, **57** (1991) 348.
- 24) 森山茂夫: “非軸対称非球面レンズの研削加工”, 砥粒加工学会誌, **36** (1992) 10.
- 25) 青木貞雄: “X線顕微鏡”, 精密工学会誌, **57** (1991) 15.