

光学材料の先進超精密加工プロセス

～ナノ精度を目指す ELID 研削、超平滑研磨、超精密切削～

独立行政法人理化学研究所

大森 整、林 偉民、森田晋也、片平和俊、上原嘉宏、渡邊 裕

Advanced Ultraprecision Machining Process of Optical Materials

—ELID—Grinding, Ultra—Smooth Polishing, Ultraprecision Cutting to Target at Nanoprecision—

Hitoshi Ohmori, Weimin Lin, Shin-ya Morita, Kazutoshi Katahira, Yoshihiro Uehara, and Yutaka Watanabe

RIKEN (The Institute of Physical and Chemical Research)

はじめに

光学素子・光電子デバイスを心臓部とするオプト技術は、我が国の最先端技術の競争力の源流となっている。特に、これらのデバイスの多くはガラスなどの硬質・脆性材料からなり、超精密加工プロセスの進歩がキーとなっている。中でも、古くからガラス加工に使用されてきた、砥石を用いた研削加工は、ガラスに対してナノレベルの鏡面を創成する鏡面研削へと進化し、さらに形状と粗さの両立を実現する磁性流体研磨 (MRF) などの超平滑研磨との連携技術へと進化している。「ELID (エリッド)」研削法は、専用加工システムの実用に伴い、ガラスの超精密加工プロセスの主流として、大型光学素子から特殊光学素子まで、用途拡大を続けている。また、切削加工によるガラスなどの回折格子の加工の試みも進められている。本稿では、1) (ELID) 研削法を中心に、2) 研磨加工法、3) 切削加工などの、最近のガラスの新しい超精密加工プロセスについて紹介する。

1. ELID 研削法

1.1 ELID 法の原理

研削加工は、砥粒 (研磨剤) を結合させ製作された工具である砥石によりガラスを削り取る加工法であり、古くから光学部品の加工に使用されてきた。ELID 研削法は、メタルボンド (ダイヤモンド砥粒) 砥石に電解インプロセスドレッシング (ELID=Electrolytic In-process Dressing) を複合して実現された高精度かつ高効率な研削加工法である (図 1)。これは、電解により砥石の結合材 (メタルボンド) のみを溶出除去させることで、ドレッシング (目立て) を確実ならしめ、また加工しながらも砥石の切れ味を維持することにより、微細砥粒を持つ砥石の持続的適用を可能にした世界初の技術である。ガラスなどの硬脆材料の超精密加工に適し、砥石によるガラスの実用鏡面研削を実現した初めての加工プロセスと言える。この電解ドレッシングには、電解による目立ての強度を調整し易くするために、パルス波形を発生する電解電源や水溶性研削液を組み合わせ、図 2 に示すメカニズムを実現している。この電解現象では、ボンド材が一定量溶出後、速やかに不導体被膜 (水酸化鉄/酸化鉄) による絶縁層が砥

石面に形成され、過度の溶出を防止する。この状態から研削加工を開始後、被加工物がこの不導体被膜に接触し、砥粒が摩耗した分だけ被膜が剥がれる。これに伴い、被膜による絶縁が低下し、再度一定量ボンド材が溶出し砥粒突出が維持される。

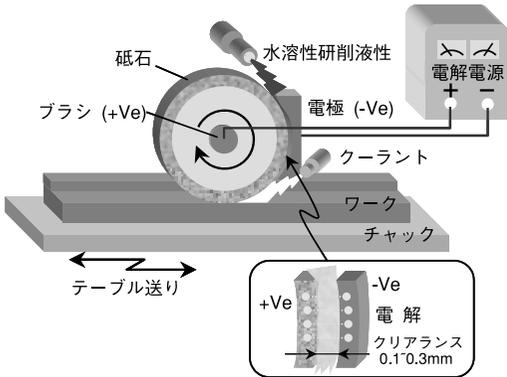


図 1 ELID 研削法の基本原理

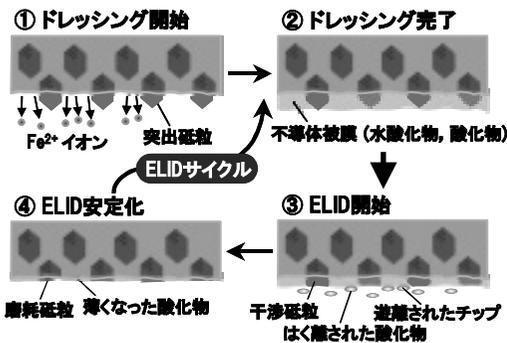


図 2 ELID のメカニズム

1.2 ELID 法の適用方式

ELID 法は、①砥石、②電源、③電極の装着により容易に実現でき、粗加工から仕上げ加工に広く適用できる。平均粒径約 $4\ \mu\text{m}$ (#4000) 以下の砥粒を持つ砥石により、ガラスなどに対しても研削加工のみにより鏡面が得られる。この場合、鏡面を実現できることから、特に「ELID 鏡面研削」と呼ぶ。ELID 研削は、所望の①加工面形状、②加工面精度、③加工能率などの要求から、必要な加工方式や機械システムが選定できる。図 3 にはその代表例として、ガラスディスクなどの平面加工と非球面レ

ンズなどの加工方式を示す。

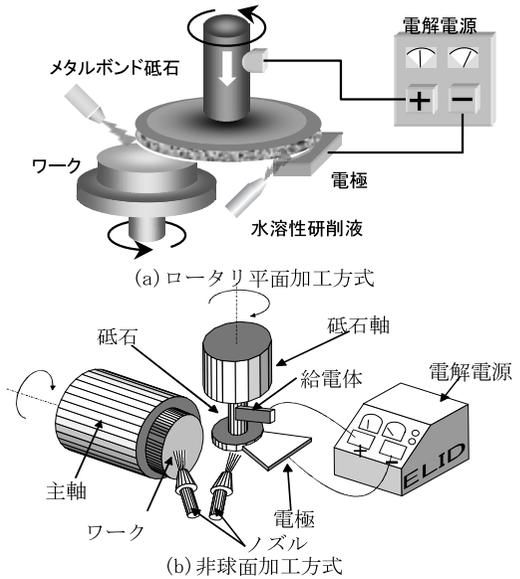


図 3 ELID 研削方式の例

1.3 ELID 法の鏡面研削効果

BK7 光学ガラスや単結晶シリコンなどでは、#4000 (平均粒径約 $4\ \mu\text{m}$) ~ #8000 (同約 $2\ \mu\text{m}$) 鉄系ボンドダイヤモンド砥石により $Ry\ 30\sim 60\ \text{nm}$, $Ra\ 4\sim 6\ \text{nm}$ の ELID 研削面粗さが得られ、さらにセラミックスなどでは $Ry\ 20\sim 30\ \text{nm}$ 以下の良好な研削面も達成されている (図 4)。#4000 鉄系ボンドダイヤモンド砥石による代表的な ELID 鏡面研削面性状を図 5 に示す。いわゆる延性モード研削面が得られている。後述するように、ELID 法では #8000 以上の微細な砥粒を持つ砥石を適用することで、一層高品位な研削面を得ることができる。

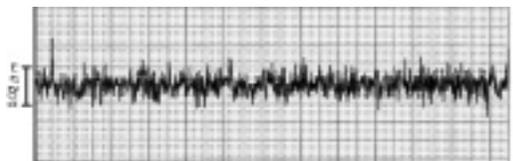


図 4 ELID 鏡面研削粗さの例

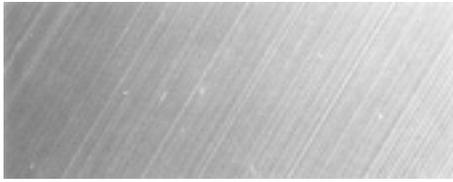


図 5 ELID 鏡面研削面性状

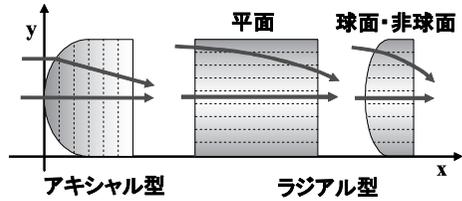


図 7 屈折率傾斜光学素子の種類

1.4 ELID 鏡面研削事例

図 6 に、ガラスなどの ELID 鏡面研削事例を示す。これまでに、光学ガラス，単結晶シリコンやゲルマニウム，セラミックス，超硬合金や鋼材などが加工されており，さまざまな工程で実用化が進んでいる。近年，ELID 研削により GRIN 非球面レンズなどの特殊光学素子の試作加工もなされている。GRIN レンズは屈折率が傾斜したガラス材により，さらなる形状を付与しレンズ枚数の削減や光学性能の向上などの効果が期待されている。一般に GRIN レンズには，図 7 に示すアキシャル型とラジアル型があるが，ここではラジアル型 GRIN レンズの放物面形状の ELID 研削を行った（図 8）。



図 8 ELID 鏡面研削された非球面 GRIN レンズ

1.5 ELID 研削システム

ELID による粗研削から鏡面研削に至る各作業性や効率・安定性を確保するために，① ELID 専用砥石，電極，電源，研削液，②

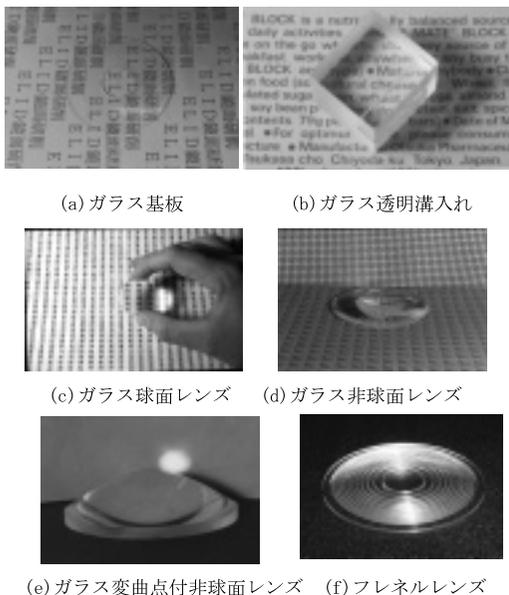


図 6 ELID 鏡面加工事例

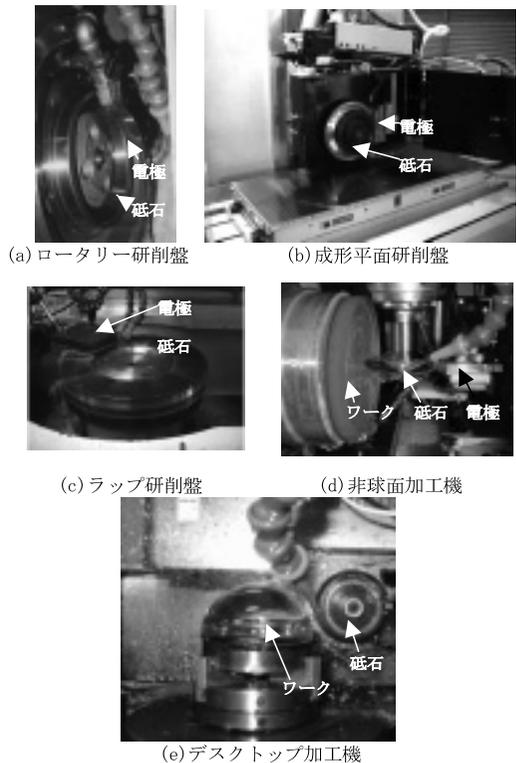


図 9 ELID 研削システムの実用例

ELID 専用加工機による専用システムが開発されている (図 9)。また、光学ガラス、単結晶シリコン、水晶などの鏡面研削には、 CeO_2 や SiO_2 などの砥粒を有する特殊な ELID 研削用砥石の効果も確認されている。専用 ELID 研削システムを積極的に利用することによって、これまでにさまざまな光学部品の超精密加工が実用化されている。

1.6 大型光学素子開発例

産業界ならびに科学技術分野において、大型光学素子のニーズが高まっている。特に先端光学分野においては、X線機器開発があり、超精密な形状精度と極限の平滑性を有した斜入射反射鏡 (ミラー) の開発が不可欠となる。中でもシンクロトロン用にはシリンドリカルミラーやトロイダルミラーが、X線望遠鏡の結像光学系には、放物面と双曲面が複合されたウォルターミラーが用いられる。筆者らが開発した 10 nm 分解能を有する大型非球面加工機を用いて、これらの大型光学素子の実用開発が進められている。1000 mm シンクロトロンミラーを図 10 に、中性子ミラーの事例を図 11 に示す。他にも、天文用レンズ・ミラー開発への適用も進められている (図 12,13)。図 14 は、さらなる精度を目指し、加工機上での計測による加工精度の補正作業の様子を示す。



図 11 中性子ミラー加工例



図 12 大型ミラーセグメント加工例

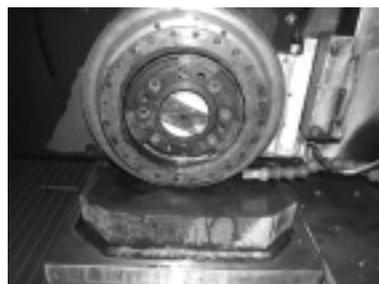


図 13 大口径非球面レンズ加工例



図 10 シンクロトロンミラー加工例



図 14 形状精度補正

2. 研磨加工法

2.1 ラップ研削

前述の ELID 法を利用してサブミクロンの超微細砥粒砥石による超平滑鏡面研磨加工：ラップ研削が実現されている（図 15）。本法は、定盤型のメタルボンド砥石を用い、定圧力の研削方式により超微細砥粒も有効に適用できる。本加工法の適用として、光学材料に対して #30000（約 $0.5\ \mu\text{m}$ ）、#60000（約 $0.3\ \mu\text{m}$ ）、#120000（約 $0.1\ \mu\text{m}$ ）による各種硬脆材料の鏡面加工が行なわれている。#3000000（平均粒径約 50 オングストローム）メタルボンド砥石を用いた超平滑鏡面加工によって、 $R_y\ 1\sim 2\ \text{nm}$ 、 $R_a\ 2\sim 3\ \text{オングストローム}$ の研削面が実現できるようになった（図 16）。

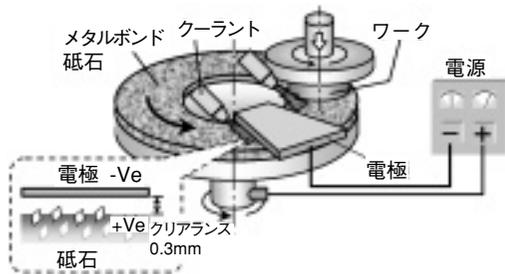


図 15 ELID ラップ研削の原理

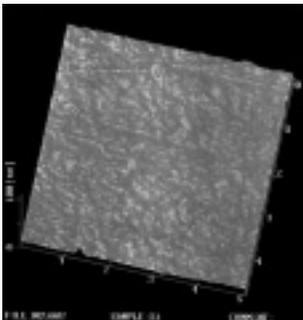


図 16 ELID ラップ研削面粗さ

2.2 磁性流体研磨（MRF）

光学部品に求められるナノレベルのプロファイルと粗さの両立を狙って、磁性流体研磨（MRF）法（図 17）の適用効果が検証されている。加工ツールとなる磁性流体の中に砥粒

（主にダイヤモンド、酸化セリウム）を配合し、磁界により研磨圧力を付与することで研磨に供する。回転し磁化されたホイールに磁性流体を吐出すると、磁性流体がホイール表面に固着されホイールと共に連れ回りを起こす。その際、NC プログラムにより被加工物とホイール間の隙間を制御することによって、必要な研磨加工が行える。また、ホイールの連れ回りと共に、磁場を離れた磁性流体は再び流動化し、吸引回収・循環され使用される。図 18 に加工システムの主要部を示す。基本的な効果を検証するために、ELID 研削後の石英材を用い、MRF を施したところ、短時間で $rms: 25\ \text{nm}$ から $rms: 0.3\ \text{nm}$ まで仕上げることができた（図 19）。形状精度は、素材やサイズ、形状にもよるが、 $\lambda/18\sim 28$ ($\lambda=632.8\ \text{nm}$) が得られている（図 20）。レーザー用ミラー材である SiC に対しては、初期粗さ $rms: 232.7\ \text{nm}$ から $rms: 3.6\ \text{nm}$ まで改善できた。

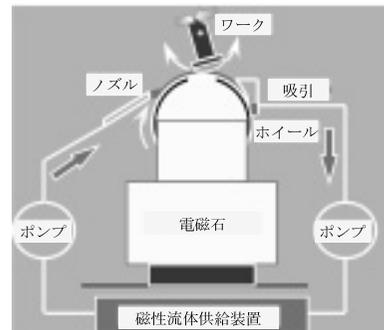


図 17 MRF 法の原理

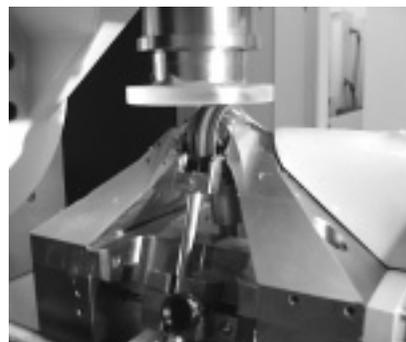


図 18 ガラスの MRF の様子

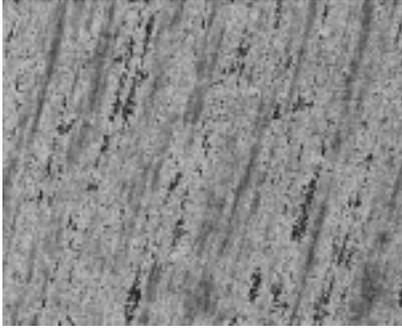


図19 MRFによる仕上げ面性状

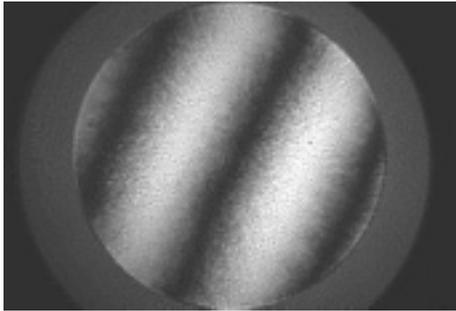


図20 MRFによる仕上げ面形状精度例

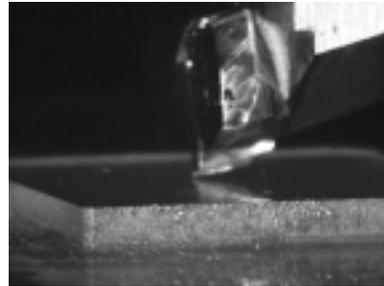


図21 シェーパ加工方法

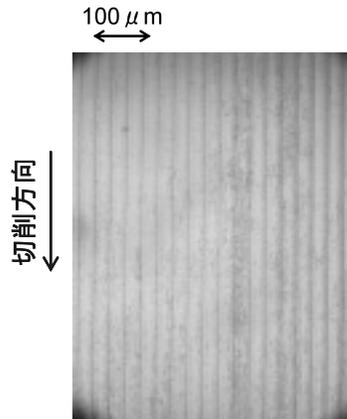


図22 切削加工された回折格子の様子

3. 切削加工法

単結晶ダイヤモンドバイトを用いて、ガラス材などの光学材料、脆性材料の超精密切削加工が試みられている。ELID法などによる鏡面研削では対応が難しい、極微細かつ急峻な形状を有する回折格子などの加工を狙い、 MgF_2 基板の切削加工事例を紹介する。図21のように、シェーパ加工方式を採用して、1mmあたり35本の溝本数を持つ回折格子の加工を行ったところ、図22,23のように、良好な加工事例が得られた。深さは約 $213\mu m$ である。加工面粗さは、概ね $Ra\ 4\ nm$ 以下が得られた。また、近年、さまざまな応用分野が期待されている金属ガラスに対しても同様の切削加工により、回折格子の加工が試みられている(図24)。

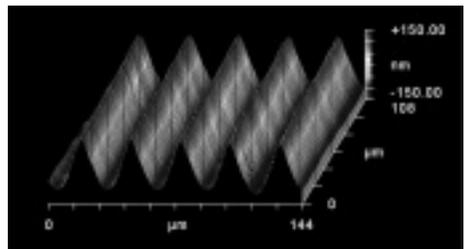


図23 切削加工された回折格子の形状データ

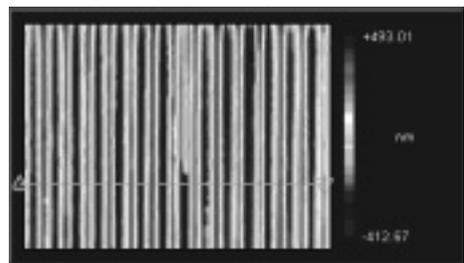


図24 金属ガラスの回折格子の形状データ

おわりに

本稿では、特にガラスなどの光学材料に対する高精度仕上げ加工として実用化が進められている各種メカニカル加工技術を中心に解説した。ELID法を中心とする一連の超精密加工プロセスは、理化学研究所が保有する知的財産であり、その実用の際には広くライセンスを進めるとともに、日本発独自技術として進展し、世界に広がることを期待してやまない。なお本稿の切削加工事例は、慶應義塾大学との共同研究の成果であることを付記し謝意を表する。

参考文献

- 1) H. Ohmori, and T. Nakagawa: Mirror Surface Grinding of Silicon Wafer with Electrolytic In-process Dressing, *Annals of the CIRP*, 39, 1 (1990), 329-332.
- 2) 大森 整: 超精密鏡面加工に対応した電解インプロセスドレッシング (ELID) 研削法, *精密工学会誌*, 59, 9, (1993) 1451-1457.
- 3) H. Ohmori, and T. Nakagawa: Analysis of Mirror Surface Generation of Hard and Brittle Materials by ELID (Electrolytic In-Process Dressing) Grinding with Superfine Grain Metallic Bond Wheels, *Annals of the CIRP*, 44, 1 (1995), 287-290.
- 4) 大森 整: 電解ドレッシングで超精密鏡面研削を実現, *日経メカニカル*, 541 (1999), 80-85.
- 5) 大森 整: ELID 研削加工技術—基礎開発から実用ノウハウまで—, *工業調査会* (2000).
- 6) H. Ohmori, et al: Development of Large Ultraprecision Aspheric Optics ELID-Grinder for Larger X-Ray Mirrors, *International Progress on Advanced Optics and Sensors*, (2003), 91-98.
- 7) H. Ohmori, et al: Nanoprecision Mechanical Fabrication for Optical Elements, *Optifab*, (2003), 12-15.
- 8) ELID 研究会ホームページ <http://www.elid.ne.jp>
- 9) ナノプレジジョン研究委員会 <http://www.nano.ne.jp>
- 10) 新世代加工システムホームページ <http://www.nexsys.ne.jp>
- 11) 渡邊 裕ら: 屈折率傾斜 (GRIN) 光学素子への ELID 研削加工の試み—第 2 報—, 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会, (2004), 767-786.
- 12) 林 偉民ら: 磁性流体研磨法 (MRF) によるレンズ金型の仕上げ, *型技術*, 19, 8 (2004), 130-131
- 13) S. Min, et al: Variation in Machinability of Single Crystal Materials in Micromachining, *Annals of the CIRP*, 55, 1 (2006).