研磨加工*

Recent Polishing Technology

難波義治**
Yoshiharu NAMBA

研磨は、太古の昔から存続している加工法の一つであり、どの時代においても付加価値の高い製品を作り出す高度な加工技術であった。英語では、ラッピング (Lapping) およびポリシング (Polishing) と呼ばれ、研磨剤を水か油で溶き、ラップ (ポリシングの場合は、ポリシャと呼ぶ) と工作物の間に介在させ、3者を相対的に運動させることにより滑らかな面を得るものである。一般的な研磨加工は、硬い研磨剤でそれよりも柔らかい工作物を引掻きにより削り取るものであり、簡単で安価な加工装置もしくは手で高度な面が得られるものであった。ここでは鏡面が得られるような研磨、すなわちポリシングについて記述する。

1. 加工機構

ポリシングにおける材料除去機構としては、1) 微小切削説、2) 塑性もしくは熱流動説、3) 化学作用説、4) 原子・分子単位での材料除去を考えるものなどがある。ガラスの光学研磨において、泉谷はガラスの水和物を砥粒が取り去るという加工機構を提案し、通説となっている¹⁾。近年は、原子単位の除去機構を考えるものが増えるとともに、研磨が表面科学の領域に跨るようになった。

2. 光学研磨

光学ガラスの加工では、結像特性に関連して一般に形状精度が重要視され、ピッチと酸化セリウムを使用した光学研磨で十分滑らかな面が得られているため、表面粗さよりは散乱源になるピットが問題視されていた。平面ならびに球面の民生用小型光学素子の光学研磨は日本から生産が海外移転した。しかし、フォトマスクのような大型平面基板、非球面、産業用光学素子は従来法が使用されている。ポリシャはピッチからポリシングクロスに急速に変わってきた。高出力レーザや短波長レーザ用の光学素子においては、散乱源がレーザ損傷源になるため、表面粗さや表面の微小欠陥、コンタミネーション、加工変質層が問題とな

り、いわゆるレーザグレードの面を必要とする。ガラスの研磨も鏡面を創成することが主目的でなく、前加工で拡散した金属イオンを除去するために使われる例も出てきた。この場合は後述する半導体の研磨技術が使用される。

球形、菱形や円盤状のポリシャを回転もしくは揺動させながら、数値制御装置で非球面や自由曲面を磨く、数値制御非球面研磨装置²⁻⁵⁾が数多く開発され、今後とも大いなる発展が見込まれる分野である。干渉計による形状計測と磁性流体を利用した光学研磨を連携させて容易に $\lambda/10$ の形状精度が得られるような研磨装置⁶⁾が市販され、国内に普及した。

3. シリコン半導体の研磨

加工変質層がなく、コンタミネーションがなく、滑らかで、狭い領域での平面度が必要な、直径に比べ厚みが薄い (1 mm 以下) 工作物 (ウエハと呼ばれる) を対象にした加工で、化学的除去加工に機械的除去加工を加味した化学機械研磨 (Chemical-Mechanical Polishing) が行われている。産業界において最も滑らかな面を量産している極めて安定的な研磨法であり、ウエハの大型化に伴う平面度確保が問題である。また、集積回路を積層するため、ウエハ上に回路が形成されてから、その表面を研磨する Chemical Mechanical Polishing (CMP) の技術が発達してきた。この場合は、単結晶ウエハと違い、複合材料の平面研磨となる。

4. 金型の研磨

複雑な形状の金型の研磨はダイヤモンド砥粒を使用した手仕上げで行われていたが、各種の多軸の自動研磨機が開発され実用化に供している。非球面光学素子を成形で製造するようになり、光学金型の需要が急増し、それを研磨するため超音波を付加する方式も生まれた⁷⁾。

5. 極限の表面を創成する研磨

フロート・ポリシング法はビデオ用磁気ヘッドのギャップ対向面の加工に使われ、年間数千万個のヘッドが量産された。また、米国ではリングレーザジャイロのミラー面の加工に使用されている。図1はフッ化カルシウム単結晶 (111) 面をフロート・ポリシングし、その断面を高分解能透過型電子顕微鏡で観察した結果である⁸⁾。この写真の範囲内では結晶格子の乱れがなく、完全に平滑な面である。より広い範囲を走査型プローブ顕微鏡 (SPM) で測定した場合の表面粗さは 0.077 nm rms である。また、シリコ

*原稿受付 平成 20 年 11 月 13 日
**正 会 員 中部大学工学部機械工学科 (愛知県春日井市松本町 1200)

難波義治

1966 年大阪大学大学院工学研究科修士課程修了、同年大阪大学に奉職。1970 年工学博士 (阪大)。1972 年大阪大学助教授。1987 年中部大学教授。専門は光学・電子材料の超精密加工。X 線用反射鏡の製作。フロート・ポリシング法の

開発。レーザ・フォーミング法の開発。

図1 フロート・ポリシングを施したフッ化カルシウム単結晶(111)面の高分解能透過電子顕微鏡断面写真⁸⁾

ン単結晶研磨面の表面粗さは $0.079 \text{ nm rms}/1 \mu\text{m}$ 角である。ちなみに、SPM で測定した場合の単元素単結晶の限界表面粗さは難波らにより求められている⁹⁾。

6. 新しい研磨技術

近年、新しい原理もしくは計測制御技術の発展に伴って新しい研磨技術が生まれており、その幾つかの例を述べる。

高速の研磨液を工作物に噴射して研磨を行う方法 (Fluid Jet Polishing)¹⁰⁾ が発達しており、山内らは狭い範囲ではあるがサブ nm の形状精度を出している¹¹⁾。イオンビームを材料表面に照射し、形状精度が高く、滑らかな面を得る方法¹²⁾ が大型光学部品の加工に使われ、高品質な光学面が得られている。特に、材料除去能率はどの鏡面加工法よりも高いと評価されている。

原らは、触媒としてポリシヤに Pt 板を使用し、フッ酸中で SiC を見かけ上、機械研磨して、原子オーダーの平滑でかつ加工変質層のない面を得ている¹³⁾。この加工法は周囲の環境を整えれば、ダメージフリーでコンタミネーションフリーの面が得られる。同様な、エッチング液による形状創成を光学素子に適用した例もある¹⁴⁾。

宇野らは大口径の電子ビームをパルス状に部品に照射して、極表面層のみを熔融し、表面張力を利用して金型等の複雑形状の部品を短時間で滑らかにする電子ビーム・ポリシング法を開発している¹⁵⁾。これは、レーザ加工後のガラス光学素子に炭酸ガスレーザを照射し、表面を熔融し、表面を滑らかにするレーザ・ポリシング法¹⁶⁾ に類似しているが、電子ビームの回り込みがあり、側面の加工も可能である。

7. おわりに

以上のように、近年の研磨加工における発展は、1) 極限の滑らかさを創成する研磨結果、2) 非球面や自由曲面の数値制御研磨法、3) 新しい原理に基づく特徴ある研磨法の開発が挙げられる。研磨における加工機構は従来の硬い砥粒が柔らかい工作物を微小に削り取るという概念では

なく、機械的に除去する場合の究極の除去単位を考える必要が出てきている。その領域においては、もはや見掛けの装置の運動は機械的であっても、材料除去機構は物理・化学・電気等の学問分野の共通接点になっており、多くの分野からの研磨の研究への参入が望まれる。

参考文献

- 1) 泉谷徹郎：光学ガラス，共立出版，(1984)。
- 2) R. A. Jones: Optimization of Computer Controlled Polishing, Appl. Opt., **16**, 1 (1977) 218.
- 3) R. J. Geraldine, A. Wright and C. M. Fleetwood: Computer Controlled Polishing and Testing of a Glancing Incidence Telescope, Appl. Opt., **25**, 16 (1986) 2835.
- 4) G. Doughty and J. Smith: Microcomputer-controlled Polishing Machine for Very Smooth and Deep Aspherical Surfaces, Appl. Opt., **26**, 12 (1987) 2421.
- 5) M. Ando, M. Negishi, M. Takimoto, A. Deguchi, N. Nakamura, M. Higomura and H. Yamamoto: Super-Smooth Surface Polishing on Aspherical Optics, Proc. SPIE, **1720** (1992) 22.
- 6) J. E. DeGroote, A. E. Marino, J. O. Wilson, A. L. Bishop, J. C. Lambropoulos and S. D. Jacobs: Removal Rate Model for Magnetorheological Finishing of Glass, Appl. Opt., **46**, 32 (2007) 7927.
- 7) H. Suzuki, T. Moriwaki, T. Okino and Y. Ando: Development of Ultrasonic Vibration Assisted Polishing Machine for Micro Aspheric Die and Mold, Annals of the CIRP, **55**, 1 (2006) 385.
- 8) Y. Namba, N. Ohnishi, S. Yoshida, K. Harada and K. Yoshida: Ultra-Precision Float Polishing of Calcium Fluoride Single Crystals for Deep Ultra Violet Applications, Annals of the CIRP, **53**, 1 (2004) 459.
- 9) Y. Namba, J. Yu, J. M. Bennett and K. Yamashita: Modeling and Measurements of Atomic Surface Roughness, Appl. Opt., **39**, 16 (2000) 2705.
- 10) O. W. Fahnle, H. van Brug and H. J. Frankena: Fluid Jet Polishing of Optical Surfaces, Appl. Opt., **37**, 28 (1998) 6771.
- 11) K. Yamauchi, H. Mimura, K. Inagaki and Y. Mori: Figuring with Subnanometer-level Accuracy by Numerically Controlled Elastic Emission Machining, Review of Scientific Instruments, **73**, 11 (2002) 4028.
- 12) S. R. Wilson, D. W. Reicher and J. R. McNeil: Surface Figuring Using Neutral Ion Beams, Proc. SPIE, **966** (1988) 74.
- 13) 原英之，佐野泰久，有馬健太，山内和人：触媒基準エッチング法，応用物理，**77**，2 (2008) 168.
- 14) M. C. Rushford, J. A. Britten, S. N. Dizit, C. R. Hoaglan, M. D. Aasen and L. J. Summers: Wet-etch Figuring for Precision Optical Contouring, Appl. Opt., **42**, 28 (2003) 5706.
- 15) Y. Uno, A. Okada, K. Uemura, P. Raharjo, T. Furukawa and K. Karato: High-efficiency Finishing Process for Metal Mold by Large-area Electron Beam Irradiation, Precision Engineering, **29**, 4 (2005) 449.
- 16) K. M. Nowak, H.J. Baker and D.R. Hall: Efficient Laser Polishing of Silica Micro-optic Components, Appl. Opt., **45**, 1 (2006) 162.