

高度の鏡面研磨とその表面粗さの測定

High Level Mirror Finishing and Surface Roughness Measuring

工学部機械工学科 河西敏雄

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering

Toshio Kasai

In this progressive age, a high level mirror finishing method, that is the ultraprecision polishing plays an important role in fabricating the newest optomechatronic devices, together with a surface roughness measuring method for very fine ups and downs of finished surface with such polishing. Then, actual situations of such polishing and measuring technologies are described. An historical account of polishing method is also given, and a comparison between surface roughness measuring instruments having the stylus detector and the optical detector is carried out.

1. 鏡面研磨のこれまでの発展の経緯

素材の表面を鏡面に研磨する技術や、その表面の微小な凹凸の状態を把握していく技術は、オプトメカトロニクス技術といった最先端技術分野で必要とする高機能・高性能部品を製作する上で必要不可欠なものになっている。

レンズやプリズムの鏡面加工のためのラッピングやポリシングは、古代の人々がものを石や木に砂を介して擦り付けて道具を作ったときに起源をもつ研磨法である。当時の初歩的な研磨法は勾玉や管玉を光沢をもつまでに磨くようになり、それが金属鏡を作り、レンズ・プリズムや光学装置の製作を可能にし、現在の光学の発展に大きく寄与するまでになった。

人類の初期の研磨法は次世代に順次引き継がれ、そのうちに専門職によって培われるようになり、長い間に洗練されていつの間にか高度の加工技術になった。このような研磨の進歩の過程は、徐々にあるが、途絶えることなく連続している。従ってその発展の流れに境界はないと思われるが、整理の都合上世代別に分けて表1に示した。

打製石器の旧石器時代から新石器時代に移行し、光沢のない磨製石器を作るようになったときを、

第1世代の研磨とすれば、第2世代の研磨は勾玉や青銅鏡などを鏡面に仕上げることを知ったときからと言えよう。単純なレンズの製作はここに分類される。

第3世代は、望遠鏡や顕微鏡が発明され、レンズを組み合わせて使うようになってからである。レンズを組み合わせて倍率を高める必要がで

表1 研磨の世代別分類

世代	特徴	適用対象
I	梨地面	磨製石器
II	光沢面、鏡面	玉、勾玉、管玉、青銅鏡
III	鏡面、形状精度、寸法精度	一般レンズ、プリズム類 金属反射鏡 ブロックゲージ、定盤類
IV-1	超精密研磨加工変質層	水晶発振子基板、磁気ヘッド シリコンやGaAsウェハ レーザロッド、各種標準器
IV-2	研磨の自動化	各種量産用レンズ類 シリコンウェハ フォトマスク用ガラス板
IV-3	電算機制御研磨	レーザ核融合用大口徑レンズ X線光学用非球面反射鏡 超精密光学用金型

るとレンズの収差が問題になり、それを解決するために研磨における形状精度の認識が一段と高まった。ニュートン(1642~1727)は、色収差の影響を避けるためにレンズを用いずに金属製凹面反射鏡の天体望遠鏡の製作を手掛けた。工具のポリシャには、現代でも使用されるピッチを採用した。直ちに加工品質や加工精度が高いものであったとは言いきれないが、現在に通じる研磨技術になってきたと思われる。その頃から学問としての光学が急速に進展し、幾何光学を基本とする光学部品の製作に向けて研磨技術が大きく飛躍した。

近年になって波動光学に基づく新たな光学部品が提案された。各種のレーザも開発され、遠赤外線からX線による幅広い波長の光も利用されるようになり、様々な光学部品の製作でますます研磨技術が重要な役割を果たすところに来た。研磨技術は、このように光学部品の発展と共に向上してきたが、最近では光学部品だけでなく、電子部品や機械部品の製作でも必須のものになっている。シリコンウェハには、平滑でかつ表層の原子配列の乱れと汚染といった加工変質層を皆無に仕上げることが要求されている。また、水晶振動子基板についても発振周波数の許容誤差が厚さ精度にして原子の1~2層が問題になるなど、ここでも寸法精度の確保と加工変質層の発生を最小限に抑えた鏡面研磨が必要になる。

第4世代の研磨は、このような高精度、無じょう乱の仕上の要求に応え得るもので格段に高いレベルのいわゆる超精密な鏡面研磨が該当する。超精密研磨は、高機能、高性能部品製作のためのナノテクノロジーを支える上で最も有力な加工技術のひとつでもある。半導体ウェハの超精密研磨は、高集積化が要求されるシリコンウェハばかりでなく、GaAsやInPなどの半導体ウェハにも必要になる。レーザ核融合やシンクロトロン放射で用いられる光学部品では、光量が材料の破壊限界に達するような高エネルギーを扱うので、加工精度の充足は当然のことであり、鏡面としても加工品質の確保が非常に重要になる。特に砥粒などの遷移金属イオンの微量が残存するだけで光学部

品が破壊するといった問題にも対処しなければならない。

超精密研磨を実現するのに、光学部品の製作で採用されてきた伝統的な光学ポリシングの改善に加え、新たな研磨法が提案されるようになった。例えば、シリコンウェハのメカノケミカルポリシング、Elastic Emission Mchining Float Polishing、Progressive Mechanical and Chemical Polishing などがある。

また、一方では、第4世代の研磨の中に研磨作業の自動化あるいは電算機制御研磨といったことも取り上げられるようになった。シリコンウェハの仕上研磨においてカセット・トゥ・カセットで人手を煩わせることなく自動的に仕上げられているように、従来からの汎用の光学レンズについても大量生産のための自動化が進んだ。上述のレーザ核融合やシンクロトロン放射光用の特殊な大口径光学部品、更に光学部品用超精密非球面金型などの高精度・高品質鏡面加工については、電算機援用の研磨法や研磨システムが確立され、失敗のない確実な鏡面研磨が実現されている。次に超精密研磨の基本的事項について簡単に説明する。

2. ポリシングの基本的事項

ラッピングやポリシングでは、双方とも研磨剤を介して加工物と工具を擦り合わせて加工を進める。図1は、その場合の研磨剤中に分散して用いる砥粒と工具の組み合わせをもとに、ラッピングとポリシングの区別を示したものである。大きさが数 μm から数10 μm の粗い砥粒と鑄鉄などの硬質工具のラップを用いて仕上面が梨地状になるのがラッピングである。ガラスをラップしたときには曇りガラスに仕上がる。一方、1 μm 以下の細かい砥粒とプラスチックなどの軟質工具のポリシャを用いて鏡面に仕上げるのがポリシングである。しかし、これらの砥粒と工具の組み合わせと相違する幾つかの研磨条件もあり、加工物の性質、部品要求、経済性などが考慮されて適切な研磨に条件が採用される。

ポリシングによって、超精密と言える高品質・

高精度な研磨を可能にしていくには、微細な砥粒と、軟質なポリシャに用いるなど、砥粒の引っかかりやポリシャの摩擦が穏やかになる条件を必要とする。スーパースムーズ鏡面という言葉で表現される最高級の品質をもつ鏡面は、将来の半導体ウエハ、マスク基板、X線光学素子などに必要になると考えられており、その表面のイメージとしては、単結晶材料のSTM(Scanning Tunnelling Micro-scope)像において画像処理されるような球形の原子の規則正しい配列で全面が覆われた状態と見なしている。

通常のポリシング用に市販されている砥粒には、アルミナ、酸化セリウム、酸化ジルコニウム、酸化チタン、酸化クロム、ベンガラ、ダイヤモンド微粉などがあり、これらの中には、加工液中にコロイド状に分散していて $0.01\mu\text{m}$ 台あるいはそれ以下のものもある。一方、ポリシャとしては、古くは、布やフェルトのような不織布、ピッチ類、ワックス類などが使用されてきたが、最近では、各種のプラスチックの中で硬質あるいは軟質の発泡ポリウレタンシートを用いる場合が多くなっている。

研磨剤を介してポリシャと擦り合わせて仕上げた研磨面は、仮に鏡面に見えても、砥粒の粒子やポリシャの凹凸の運動軌道によって、回折格子あるいは、ピラミッドや円錐が並んだような凹凸面

が形成される可能性がある。このような場合、可視光の数100分の1の波長のX線の光学系にとっては曇り面であるかも知れない。しかもその下には、原子配列の乱れとしての加工変質層が表層の数原子層から数100原子層まで及ぶ。シリコンなどの半導体ウエハにとってはこれは大問題である。

スーパースムーズ鏡面に近づけていくには、これらの表面構造を小規模にする諸条件が必要であり、一義的には既に述べているように、より一層細かい砥粒と肌理の細かなポリシャ、軟質なポリシャを採用することで解決できるはずである。また、砥粒やポリシャには機械的作用で乱れた部分を化学的に取り除くような加工液の使用や加工面と砥粒の間のメカノケミカル的な化学反応現象を利用した加工条件の導入も図られている。

なお、ポリシャの最も軟質なものとして、液体そのものを用いてそこに浮遊する砥粒による加工法がEEMやフロートポリシングの名称で表される研磨である。砥粒を含む薄い研磨剤層を形成し、液中に浮遊する砥粒が加工面に軽微に作用するような加工装置の開発も進んでいる。

3. 鏡面の表面粗さ測定について

表面の微小な凹凸の状態を評価する方法として、表面粗さ測定法があり、JISでも規格化されている。しかし、普通の鏡面やここで挙げている高度

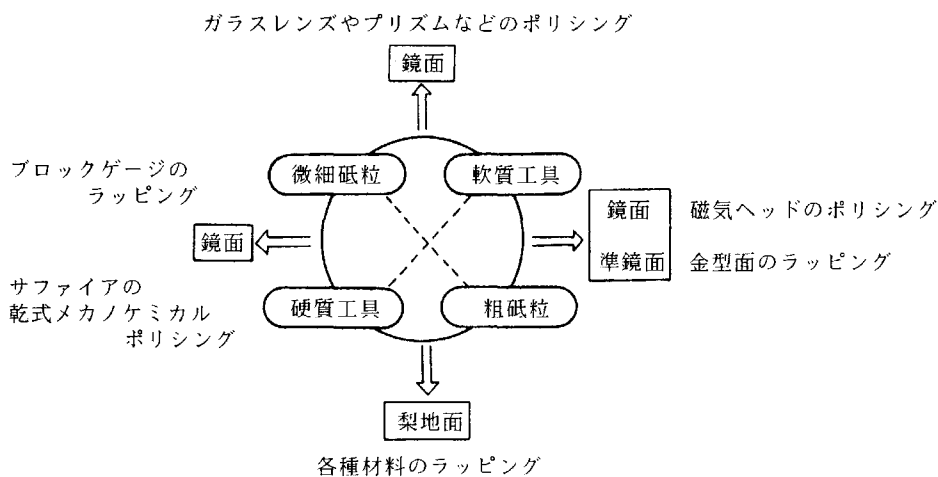


図1 ラッピング・ポリシングにおける砥粒と工具の組み合わせ

なスーパースムーズ鏡面の微小凹凸について測定・評価する方法の規格の具体化はあまり進んでいないようである。

表面粗さについては、ひとつの考え方として加工に結び付けてみると、加工条件というインプットに対するアウトプットと見なせる。より高度な鏡面を仕上げるには、表面粗さを微小にする加工条件を選択することが必要になることは前述の通りであるが、表面粗さが非常に小さく凹凸がサブナノメートルオーダー以下になるとその測定は容易でない。しかも高品質の研磨技術の向上は高性能測定装置の有無に支配されるだけに問題である。

表面粗さ測定法に関しては、これまでに様々な提案が行われた。特に、鏡面の微小な表面粗さ測定では、検出法に

- ①触針でなぞることによる接触測定
- ②反射光の干渉法などによる非接触測定
- ③STMやAFMなど最進の材料間の微小間隙の物理現象を利用した測定
- ④SEMによる2次反射電子による測定

などがある。

また、その走査法に①直線走査 ②円形走査、更に③等間隔の平面走査があり、データ処理にも、①単純な断面曲線とそれをもとにした中心線平均粗さRa、10点平均粗さRz、最大粗さRmaxなどの表示や、②立体的な凹凸の3次元表示、③色の使い分けによる2次元表示などがある。

表面粗さのデータ処理とその表示については、電算機ソフトの高度化が進み、加工した面の情報が容易に把握できるようになっている。

なお、検出法で、最も一般的なダイヤモンド触針で表面をなぞる方式は歴史も古く、最高倍率が200万倍から、500万倍に達するものが開発されている。光学式には、非接触という利点があり、倍率についても最近非常に高いものも現れた。いずれにしても1nmの凹凸を数mm、あるいは数10mmに拡大表示しており、その確かさを明確にすることも研究が行われている。例えば、高純度のシリコン結晶の格子間隔を基準にし、回折X線の干渉現象を利用して微小寸法を測定する方法は国

内外の計量研究所に相当の機関で研究されている。

埼玉大学では、大小異なるCeO₂砥粒とピッチポリシャを用いるポリシングで溶融石英とシリコンを鏡面に仕上げ(試料#1、#2)、各機関に持ち回りで表面粗さ測定を行った。

砥粒の大きさの違いによって表面粗さに違いが生じているのは確かと思われるが、それを各種の表面粗さ測定機において検出できているか、触針式の測定機と光学式の測定機を用いてデータ比較を行った。

図2は、シリコンウエハの測定結果の一例である。Ra、Rrms、Rmaxはそれぞれ表面粗さの規格に基づく表示であり、横軸は小さいCeO₂砥粒によりポリシした面(#1)のデータ、縦軸は大きいCeO₂砥粒による面(#2)のデータである。本来45°の斜線より上側にデータが存在するはずであるが、測定感度限界を越えたものは、両試料の表面粗さの区別ができず、45°斜線上にデータが載る。それぞれのポリシング条件の相違による表面粗さの測定は可能であり、特に光による測定の方が表面粗さデータ値が大きいことが伺える。

4. 今後のスーパースムーズ鏡面研磨技術の展開

高品質・高精度を狙った高度の鏡面研磨のこれまでの発展とその表面粗さ測定について簡単に述べた。十分な紙面をとれないことから言いつくせないところがあることはお許しいただきたい。研磨技術については、砥粒やポリシャのような研磨資材に新しいものが出現すると技術の飛躍がみられ、また、部品用に新材料が開発され、新部品製作の要請が発生するとそれを目指して技術が向上していくのがこれまでの常であった。

表面粗さ測定は、それを支える上で必要欠くべからざるものである。今回、表面粗さ測定に、光学式のもの表面粗さ値が大きく現れることを示したが、各機関を持ち回るのに数週間を要したこと、表面には汚れが付着するのでそれを拭き取る操作も入る。更に研磨した新生面は活性が高く、そこに付いた塵埃はそのまま固着する現象もみられ、実験データに信頼性が問われるところもない

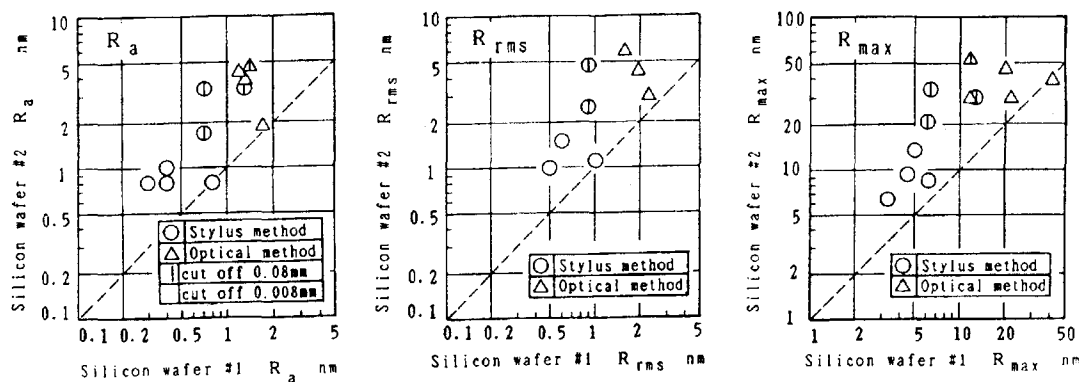


図2 表面粗さの相違する2種類のシリコンウェハ（#1、#2）を触針式表面粗さ測定機4台と光学式表面粗さ測定機3台で測定比較した結果

ではない。従って、このデータについて測定機メーカーからクレームが出ることも考えられる。現在、国際的に精度や信頼性の高い最高級と言われる表面粗さ測定機には、触針式、光学式、更に、STM・AFM原理を用いたものなどに4～5種類ある。それらを全て揃え、研磨を行って直ちに測定・比較検討を行うといった研究は行われていない。メーカーなどの研究機関では、表面粗さ測定機が高価であるが故に、どれか最も信頼のおける機種を明確にすることが望まれているがその根拠が乏しいのが実情である。当大学では、様々の表面粗さ試料が提供できるので、これらについて本格的な対処を考えている。

なお、研磨における表面粗さの加工限界が表面粗さ測定機によって支配されることを述べたが、早期に高感度の光学式表面粗さ測定を導入した企業における研磨技術の向上に著しいものがあったことを記して終わりとしたい。