

■第5話 高精度研磨

埼玉大学名誉教授
(株)河西研磨技術特別研究室 代表取締役
河西 敏雄

今回は、筆者が担当する最終回の話題として、前回の高品質研磨に引き続き高精度研磨に挑戦した経験についてとりあげてみる。

部品・材料の加工では、機能・性能を引き出すために所定の加工品質に仕上げることに加え、加工精度を整える技術が必要である。また、大学などにおける研磨に関する研究で、加工量や表面粗さなどの加工特性を検討する際、実験担当の学生の未熟さもあって、工作物と工具の面精度を無視して両者が全面当たりに達していない状態で得たデータなどは、再現性が乏しく研磨理論で扱う場合どうも気になる。しかも通常のラッピングやポリシングの精度確保のための実技は、重要であるにも関わらず、企業の現場作業者に任せていてあまり研究的に取り上げられてきていない。これらの実情を念頭に置いて、筆者が経験してきた平面研磨における精度仕上げの過程等について触れてみたい。

1) 東北大学科学計測研究所レンズ研磨工場における研磨実習

前々回で触れたように研磨精度に関する研究に携わることになったのは、NTT通研におけるLiTaO₃単結晶電気光学素子という具体性のあるデバイスの研究試作に着手してからである。それまで精度抜きでガラスのラッピング、ポリシング特性の追究を進めていただけで、高精度の研磨の知識や技術は持ち合わせてはいなかった。この電気光学素子については、作製依頼を出した外部企業がギブアップしたこともあり、研究所内の結晶育成、部品化、光通信方式関係の研究の全ての進行が滞っていた。そこに筆者が大学から当研究所に研磨の研究者として移籍したので、素子形状に研磨加工ができないなどと言えるような状況ではなかった。前回までに述べてきたように、赴任すると同時に東北大学のレンズ研磨工場でピッチポリシングによる平面研磨の実技指導を受けることから始まった。高精度の結晶素子研磨にまったく経験がなかったのも、然るべき企業の研磨現場で実習することを前もって希望しておいたことが聞き入れられ、本当に幸運であったと思う。結晶素子加工を前提にしたガラス小片ブロックの加工を通して高精度研磨技術の基本をはじめて身に付けることになった。実習期間15日間と僅かであったと言っても内容が非常に濃く、46頁にわたる報告書は、所内資料として印刷物になった。

当レンズ研磨工場では、通常ラッピングに回転鋳鉄ラップを取り付けた荒すり機を、最終ラッピングの砂掛けに固定鋳鉄定盤を、ピッチポリシングにオスカータイプのレンズ研磨機等を用い、さまざまな光学部品の高精度研磨を行っていた。

そこで研磨の技術指導を受けつつ、持ち込みのBK7ガラスの切断片から光学素子想定15mm□×t10mmブロック、それを斜めに切断したウォラストンプリズム想定1辺18mm×t10mmの2等辺直角三角形プリズムブロックの研磨・作製実習を行った。荒すり機によるラッピングが未経験であったこと、高価な結晶を扱うことを前提にして研磨機の回転を止め、ハンドラッピングにより個々のガラス切断片の研磨を進めた。特に砂掛けでは、砥粒をラップ面に供給し、別のラップで軽く摺り合わせるように砥粒を一層に広げ、それにガラス片を螺旋を描くように手で擦りつけてラッピングを行う。全てのブロックをハンドラッピングで済ませたのでかなりの時間を要した。しかし、ハンドラッピングのぎこちない手の動作が作業を重ねることによって順次改善され、終わりの頃にはラップ全面に描かれる摺り合わせの軌跡が均一になり、工作物だけでなくラップ面の摩耗変形も抑えていく感覚と技術を身に付けることができた。それぞれのブロックの形状精度に関係する工程に触れてみたい。

加工の流れは、「(全ブロックの各面の加工はダイヤモンド砥石による切断面から始まる。)⇒(□ブロックの平行平面に加工する面とプリズムの側面の片面だけをハンドラッピングで切断痕を取り除く。)⇒(次いで1μm以内の板厚偏差をもつ□150mm×t10mmの平行平面ジグを用い、それに各ブロックのラップした面を配列してパラフィン系接着剤によって加熱接着する。)⇒(冷却のあと平行平面ジグと一体のままこれらのブロックのハンドラッピングを行う。基準を平行平面ジグにおいた研磨であり、□ブロックの2面とプリズムの両側面の切断痕は消え、平行平面に仕上がる。)⇒(□ブロックについては、そのまま砂掛けを終えてピッチポリシングによる

平面研磨で鏡面に仕上げる。)⇒(次いではく離し、今度は鏡面側を平行平面ジグに接着し、ハンドラッピングで平行平面ジグの外周のブロックのジグを含めた厚さ偏差を小さく仕上げ、同様にポリシングを済ませる。)⇒(はく離した□ブロックは、6個のブロック鏡面を互いに貼り合わせて四角柱にする。その1側面と鏡面が直角になるようにハンドラッピングを行い、切断痕を完全に除去する。)⇒(四角柱のラップした側面を平行平面ジグに配置・接着し、ハンドラッピングで平行に仕上げる。)⇒(四角柱の別の面も鏡面や他の面との直角になるようにハンドラッピングで仕上げ、平行平面ジグに配置・接着して同様に平行に仕上げて終了する。全ての面を平行平面ジグの助けを借りて平行平面に仕上げたことになる。)⇒(一方プリズムブロックについては、ハンドラップした側面を平行平面ジグに接着してハンドラッピングで平行に仕上げ、はく離後、6個の側面を貼り合わせて三角柱にする。両側面は鏡面に仕上げてないが、□ブロックの四角柱の準備と似ている。)⇒(しかし、ここではプリズム側面を基準にし、プリズムの直角を構成する第1面と第2面を、次いで対角面を直角にする。また第1面と第2面が互いに直行していること、かつ対角面と45°をなしていることを確認しつつ、全てハンドラッピングで修正加工する。)⇒(直角プリズムの第1面、第2面、対角面の鏡面化では、旧態依然とした石膏づめ法を採用して固定し、ポリシングを行った。)⇒(石膏づめ法の基本は、ポリシングのために砂掛けを行った複数個の三角柱の第1面を微量の油を伸ばすように塗った工具のラップ面に摺り付けるようにし、油の粘度を利用して仮固定する。それらの外周に簡単なトタン製の枠を設置し、大鋸屑を適度に播いて石膏を流し込む。大鋸屑の厚みが石膏面からプリズム研磨面の突き出し量になる。凝固後、ラップ面から石膏の塊として滑らすように取り外し、大鋸屑を筆で掃き除き、石膏の表面に加熱した溶融パラフィンで防水処理を施し、そのラップで砂かけを行ってポリシングに移る。ポリシングを終えたならば、石膏を破壊して三角柱をとりだす。第2面と対角面についても同様な石膏づめによって順次ポリシングを行う。)」。

得られた精度は□ブロック24個と直角プリズム30個の各面の平面度は $\lambda/10$ 以下、平行度20"以内、プリズムの直角度は、6個が $90^\circ \pm 20''$ であった。これらの精度は研磨技術に負うところが大きかったが、接着法をはじめとする取り扱いや計測など周辺技術は無視できない。接着誤差を抑えるため最小量の接着剤を供給することに心掛け、また塵埃の存在による接着層の傾きを避けるために研磨ジグと工作物の間に生じる干渉縞を単色にした状態で接着剤を供給するなど工夫を行った。プリズムの各面のポリシングで用いた石膏づめ法も簡単な周辺技術として片付けることができなかった。例えば、石膏づめを行った状態のポリシした面の干渉縞測定で不要な反射光の影響を避けるため、プリズムの2面に溶剤に溶かしたピッチ液を薄く塗り反射防止を施すほか、さらにその外周を溶融パラフィンで保護する方法を用いていた。これは石膏と凝着を防ぐことにもなる。ただし、このようにした石膏づめの石膏は不安定で「息をしている」状態にあると言われた。ポリシングの途中、昼食などにより研磨を中断するだけで石膏づめしたそれぞれのプリズムの平面度を示す干渉縞が変化して勝手の方に向きを変えることも体験した。一気に研磨を終えることが肝心であることを実感した。現在でこそ、研磨ジグのリセス皿にセットして研磨しているが、まだ石膏づめが盛んに行われていた時代のことである。当時の石膏づめの実態は、プリズムの三角柱の各面の角度関係をハンドラッピング等で確保しておき、それぞれの面を鏡面に仕上げる場合は、いわゆる加工面基準の平面研磨であった。平行平面ジグやリセス皿を用いる背面基準研磨の場合とは大きく異なる。

当工場では、平行平面ジグのほか、市販のAAA級より優れた平面度測定用のオプチカルフラットを自給自足しており、プリズムの直角や45°の角度チェック用の角度定規についても、ガラス板の直定規3本を研磨で仕上げ、1本を2本で挟み、90°あるいは45°の標準角ブロック(ゲージ)に沿わせて接着・固定したものを用いていた。ハンドラッピングによる角度修正では、ブロックとこの角度定規の隙間を肉眼で見ても無くなるまで修正研磨を行うことになる。隙間の確認限界は、一般の人で0.02mmと言われている。最終の角度測定には、オートコリメータを使用した。また石膏づめしたプリズムのオートコリメータによる角度測定と角度修正について、石膏の側面にプリズムまでトンネルをあけておいて角度誤差測定を可能にし、加圧調整、研磨時間設定による修正研磨の説明を受けた。

2) レンズ研磨機による平面研磨について

上記のようなレンズ研磨機を用いるピッチポリシング技術を、名人と言われる高精度の技能を持つ方から直接指導を受けることができた。書籍等に詳細に記載されていないことなどに触れる。

レンズ研磨機は、下皿の回転と上皿の往復・回転による研磨運動と上皿の付加荷重の調整によって高精度の加工を進めることができる。ただし研磨条件であるこれらの選択・調節はかなり複雑である。量産現場では、できるならば熟練作業者に頼ることなく、短時間で前加工のラップ痕を除去し、同時に所定の精度に仕上げるのが望まれている。そこではこれまでの実績から得たデータベースをもとに、工作物の外径、配置、工具口径などに見合った運動条件を採択することができ、あたかも技術化が進み、熟練者に頼らなくても所定の精度の研磨ができるところにきているように見える。しかし、工作物の口径などがひとたび大きくなるとそれまでの条件のままでは精度が得られないといった問題がでてくる。当レンズ研磨工場における実習では、そのような要求にも対応することができ、特に平面度の修正研磨が可能な技術を身に付けることである。

平行平面ジグに接着した□ブロックの平行平面研磨は、まさにオプティカルフラット研磨そのものであり、実際に使用した平行平面ジグの作製にも用いた研磨技術である。□ブロックを接着した平行平面ジグを研磨機下皿に固定する場合、薄板に類するので加熱接着によるベタ貼りなど研磨時における変形などを生じることを避けるために古くからのヤニ団子(ピッチ)による接着・固定法を用いた。ジグと下皿の間で5個のヤニ団子の配置位置を決め、加熱により多少軟化した状態で押し付け、潰れた面にピッチ溶解のトリクレン液を筆で塗って両者を軽く押さえつけて固定した。話が脱線するが、この固定法については、その後、筆者はヤニ団子に代わってゴム粘土の団子を用い、下皿とジグの間をビニールテープで巻いて防水する方法に改善している。□150mmのジグに敷きつめた□ブロックのポリシングでは、上皿にφ120mmのピッチポリシャを用いた。

ガラスなど円板状のオプティカルフラットを作製する場合、レンズ研磨機の工作物と工具あるいは上皿と下皿の口径の関係は、1: (0.7~0.9) であると言われる。ピッチポリシャは、ピッチの厚み3~4mm、ピッチの網目2~4mmを用いた。

ポリシングの開始時、前加工の砂かけを終えた工作物の平面度は無視できない。平面度修正を含むピッチポリシングでは、ひとつの策として砂かけで工作物の全面を1μm以下の僅かな凸状に加工しておくのが普通である。やや凹状のラップを用いて形状精度を反転することによい。一方、ポリシャも同様の定盤とすり合わせて凸状にしておく。摩耗や変形しやすいピッチは工作物の凸状になじんで単純に凸状から凹状になると思われるが、ここにもひとつのノウハウがあった。ピッチポリシャを製作する際に、中央部ほどしっかりと濃く網目を、外周部になるに従って順次薄く網目を付けるといった平面でありながらも半径方向に網目の濃淡差を付け、凸状効果を持たせるといった工夫を行う。

下皿の工作物回転14rpm、ポリシャの円弧往復60回/分と従動回転等の条件を採用する。振振幅とかんざしのセンター位置、付加荷重などの調整によって凸状の工作物の中央が平坦状あるいは僅かな凹状にする。あたかもトンビが羽を拡げた形状に見立て、そのトンビ形状を順次拡げていくといった平面修正原理を用い、平面研磨を実現した。

確かにレンズ研磨機によれば下皿の回転と上皿の往復・回転は非常に合理的な研磨運動である。筆者らが問題にしたのは、これが小片と言える単結晶1個を高精度・高品質の平面に研磨することに応えることができるものかということであった。NTT通研でLiTaO₃単結晶片の平行平面研磨を依頼した外部企業3社が全て凸面に仕上がり、ギブアップしたことを以前に述べた。レンズ研磨機を用いる小片結晶の高精度・高品質の平面研磨では、ピッチポリシャを用いることが必須であり、その場合、結晶周囲にダミイ材料を配置して研磨するのが普通である。ダミイ材料が結晶材料と全く同一であれば問題ないであろう。ラッピングやポリシング特性としての加工量が結晶よりも大きい光学ガラスをダミイ材料にすると結晶が突き出た状態になり、凸面に仕上がる。何度繰り返しても凸面であった。また、この結晶よりも加工量が小さい水晶をダミイ材料にした場合、ラッピングで凹んだ状態になってポリシングに予想外の研磨時間を要した。そこでレンズ研磨機では、小片結晶を高精度平面に仕上げることはできないと早期に判断した。このような経験を経てレンズ研磨機から小型修正輪形研磨機製作へと展開していくことになる。なお、レンズ研磨機による高精度研磨技術を身に付けながらも新しい研磨法に目移りしたように周囲から

誤解されたことについては既に説明した。しかし現実には、僅か3, 4ヶ月後にはLiTaO₃単結晶電気光学素子を完成させなければならないところに押し迫っていた頃のことである。

3) レンズ研磨機 ⇒ リング工具研磨機 ⇒ 修正輪形研磨機へ

まずは、レンズ研磨機を用いるピッチポリシングの平面仕上げにおける必要条件の分析を行った。工具面が平面であればそれに擦り付けた工作物は平面に仕上がる。平面が劣化したときには、研磨を中断して工具面を平面定盤に摺り合わせ、これで平面修正を行う。しかしピッチポリシャは、軟質であり、磨耗・弾塑性によって変形しやすい。ひとたび結晶がダミイ材料に比べて凸状に突き出ると、研磨を中断して平面に修正したポリシャを用いたとしても凸状突き出しによって直ぐに凹むことになる。これより研磨を中断することなく平面を維持する機能をもつ研磨機を考えなければならなかった。

以前に研磨速度と加工量の関係を求めたとき、レンズ研磨機では運動が複雑であって研磨速度を求めるのに不都合があり、リング工具型研磨機を用いることによって解決したことを述べた。きわめて再現性が高かったこともあり、これを小片結晶とダミイ材料からなる工作物の研磨に取り入れることに念頭において検討を進めた。リング状のポリシャと円板状の工作物の関係であってもポリシャの平面劣化は工作物の平面劣化に直結する。そこでポリシャの平面劣化を研磨の中断なしに修正し、あるいは平面を長時間にわたって維持していくために、工作物研磨を進めつつ工作物、修正輪、修正板により工具修正を同時進行していく形式を採用することにした。いわゆる修正輪形研磨機である。

当時、既に修正輪を用いる市販研磨機があったが、修正輪の大きさを決定する根拠がない。ピッチポリシャのような磨耗変形の著しい工具の場合、考え方によっては修正輪による形状修正は容易と考えた。そこでφ60mmの工作物に対して修正輪の外径を決めるのに、レンズ研磨機の円板状工作物と工具の関係を参考にした。レンズ研磨機による高精度の平面研磨では、上皿と下皿の口径の関係は1:(0.7~0.9)であり、面積比にすれば1:(0.5~0.8)である。レンズ研磨機では、仮に面積比が1:0.1といった大きな差があると工具面にうねりのような凹凸が形成されて平面劣化につながることも経験してきた。このようなことからφ60mm(≒28cm²)の工作物に内外径φ60×φ90mm(≒36cm²)の修正輪を、さらに同様な修正輪やφ90mmの円板状修正板を用い、ポリシャの修正効果を高めるようにした。またリング工具についても、ピッチポリシャの作製が有利であること、ポリシャ面の洗浄が容易であること、研磨中の平面劣化があってもその修正が可能であることなどを考え合わせ、工具と、工作物、修正輪などを図面上に描き、内外径φ30×φ180mmと小型修正輪形研磨機にした。(工具面積):(修正輪+工作物+修正板の面積)≒1:0.5であり、さらに1個の修正板を追加するならば面積比は1:0.75になる。

これによってガラス円板工作物を平面に仕上げるピッチポリシングが可能になった。さらにオプチカルフラット級の平面研磨を可能にする重要な条件として、ポリシャ回転に対して工具や修正輪が自由回転であったものを手指で同一になるように強制回転させ、工作物の全面で研磨速度を一定に保ったことである。手指による人為的な強制回転を長時間にわたって続けるといいことが精度との戦いになり、かつ研磨機と会話しながら研磨を行って好結果を得ることができた。幾度か述べたがレンズ研磨機からこの研磨機に移行することが同意できない人が少なくはなかったもので、17:00過ぎの仕事に進めた。幸いにもレンズ研磨機を簡単に改造し、短期決戦で平面研磨を成功させ、11月の研究所公開の実演に供することができた。その後は、なぜ高精度の平面研磨が可能になったかという新たな課題に挑戦し、研磨理論の研究に展開していくことになる。

さらに、結晶片に対してあえてダミイ材料を離れた位置に配置するといった従来の考えと矛盾するような新条件を用いた。研磨中に平面劣化が常時修正されていく修正輪研磨機の特徴を活かして高精度平面研磨が可能になり、LiTaO₃単結晶電気光学素子作製の短期決戦に対応できた。その後、TeO₂単結晶超音波光偏向素子や水晶、LiTaO₃の圧電フィルター基板などの高精度平面研磨でも活用できた。

現在では、本機は動圧軸受けを用いた安定回転の小型修正輪形研磨機として完成度を高めた研磨機になっている。また、このほか必要に応じてさまざまな研磨機製作を行ってきた。ひとつは結晶薄片基板研磨用の超小型両面研磨機である。☒

5.1は試作機である。上下の逆転する小径工具の間で外周から張り上げた薄いマイラシートにパンチした穴に結晶薄片を挿入して両面同時研磨を行う。これはLiTaO₃単結晶のような均一エッチングが不可能な素材の薄片研磨で周波数調整を行ううえで有効なものになった。

1974年頃、大口径の磁気ディスク基板の研磨を行うことになった。当時はφ14インチ磁気ディスク基板が主流であり、それをφ18インチ基板にして記憶容量アップに応えることになった。研究プロジェクトが発足し、基板加工技術の研究と媒体研究用の基板提供を担当した。一般の磁気ディスクは、記録媒体のγ-ヘマタイトを分散した溶液を準鏡面切削したアルミ基板に塗布したものであった。一方、磁気ヘッドもトラック幅50μmであり、現在の高性能の小型HDD装置と比較できるものではなかった。しかし当時の最先端の磁気ディスクとして、記録媒体をめっき技術で形成することを目指すことに決まり、アルミニウム合金板をラッピングで平行平板仕上げ、それに無電解めっき膜を形成してラッピング・ポリシングで鏡面に仕上げる方法を選んだ。薄板の研磨であるから両面の加工変質層等に関係する応力にアンバランスがあると反りやすい。ディスク研磨の基礎実験では、φ14インチの内径を打ち抜いた約φ6インチのアルミニウム合金板を用いて両面ラッピングを進めた。しかし、いざφ14あるいはφ18インチの基板加工になると、国内には大型の両面研磨機がまだ生産されていなかった。大型両面研磨機の輸入か、それとも国内研磨機メーカーの大型研磨機の開発費を負担し、完成に数ヶ月～1年を待つという選択が迫られる頭の痛い問題がでてきた。そこで修正輪形研磨機製作の応用として、図5.2のように磁気ディスク基板を修正輪形研磨機の円環工具に見立てることにし、その外周を3点ローラで保持して垂直に立て、基板の両面からあたかも修正板のような工具2枚で挟むようにして回転させる縦型の両面研磨機を発案して解決を図った。磁気ディスク基板の加工技術の研究終了後、研究室では記録媒体研究室に基板提供と媒体めっき面の再研磨のため、本機を3台増やし、2年にわたり媒体研究室のための協力体制を維持した。



図5. 1 試作した超小型両面研磨機



図5.2 大口径磁気ディスクと修正輪形研磨機の応用として
試作した縦型両面研磨機

4) 平面研磨に関する研磨理論(理論実証に要した計測手段の改善を含めて)

研磨について理論的な扱いをしてみたいという考えは誰もがもっていたように筆者も大学の助手時代の頃から意識していた。当時、機械加工の理論的扱いに関しては、重点が切削から研削へと移りつつあった頃でもあり、研磨では何を理論的扱いの研究対象にすればよいのか決めかねていた。母性原理が成立し、かつ運動転写型の加工法である切削や研削では、表面粗さ、加工抵抗、加工時発熱……などの加工実験結果に対して理論的裏付けが既に進められていた。恩師であり、上司であった故織岡貞二郎先生は、研削において砥石の整然と並ぶ砥粒切れ刃と工作物の相対運動で導かれる表面粗さの理論式に、さらに砥石面における砥粒の様々な分布がポアソン分布であることを実験で確かめて確率論を導入し、その成果が国内外で注目されていた。それまでは幾何学的に求めた表面粗さの理論値と実際の研削結果の間には10倍以上の開きがあった。砥粒切れ刃の三次元的な分布に確率論を取り入れるとその開きが小さくなり、実際と対応が付く理論式になっていた。

研磨に関するものには、それまでDaveや故松永正久先生のレンズ研磨機、両面研磨機、修正輪形研磨機などの運動解析があった。これらは研磨機の製作で必要になる有益な情報を得ることができた。また故今中治先生のラッピングのける粗粒の機械的作用のもとで形成される表面粗さや加工量に関する理論式を導出している。しかし微細砥粒を用いるポリシングになると、当時でも砥粒の機械的作用のほかに化学作用が重畳しているという一般的な認識があり、工具のポリシャが軟質であることもあってこれらを考慮して理論的に扱っていくことは困難であった。

4.1) 比例定数 η_w 、 η_t について

筆者は、織岡先生のご指導のもとガラスの高速ポリシングの研究で工具材料、研磨液、速度、圧力などの研磨条件と加工量の関係に注目していた。このとき問題になったのがレンズ研磨機を用いたときの速度や圧力と研磨量の関係が不安定だったことで、前回までに述べたリング型工具で好結果を得たことである。これらの経験だけでは直ちに研磨の理論的扱いを開始するにはまだ準備が整っていなかった。研磨をサブワークと位置付けていてメインワークが研削であったこと、織岡先生が急逝されたこと、研磨企業から精度に関する研磨技術の指導が得られないことなどがあって先延ばしにしていた。しかしそれでも外部からの委託研究があり、ラッピングやポリシングにおける加工量、工具摩耗量などのデータ整理の過程で比例関係が明らかになってきたこともあり、レンズ研磨研究委員会に加工量と工具摩耗量の比例定数 η_w 、 η_t に関して提案し、単位、名称等を取り決めていただいた。Preston がポリシングの加工量が速度と圧力に比例することを公表したのは1927年、まさに昭和初期であり、筆者が生まれる10年も前のことである。それを筆者が知ったのは、上記の η_w 、 η_t を提案してから、NTT通研で研磨理論の研究を進め、それから埼玉大学に移籍してからのことで、1984年の超精密技術調査団の一員として米国に同行したときであった。

ところで加工量や工具摩耗量が要因である速度、圧力、時間に比例することは、それらが等価であって、例えば研磨時間を短縮するにはそれに応じた速度や圧力

を単純に調整することができ、容易に実証もできた。一方、それまでに比例関係が損なわれるような場合も経験している。そこでは工具回転が原因することが多い。研磨剤が飛散し、工作物と工具面間で直接摩擦が生じ、また反対に研磨剤が多量にあって工作物が浮上するようになり、正常と言えない研磨状態になり、比例関係から外れてくる。

4.2) 平行度、結晶方位誤差の修正研磨

続いて平行度の修正研磨の圧力の片寄りを利用する場合の研磨理論に触れる。一例として荒ずり機によるラッピングでは、工作物の平面度を維持しつつ、指先や手のひらで平行度修正側に圧力を加えた研磨と厚さ偏差測定を交互に行って修正研磨を進めてきた。これを研磨ジグ利用に置き換えることにし、**図5.3**のような偏心分布荷重の理論的な裏付けと新たなジグの提案を行った。既に偏心集中荷重の圧力分布については、材料力学の教科書のなかの「短柱の偏心荷重」で詳細が示されており、使用条件によっては負の圧力、すなわち剛体材料の研磨になると加工されない部分が生じる。このような問題を避けるものが円柱を斜めに切断した偏心分布荷重であって筆者にとって初めての特許出願にも結び付いた。加工量の η 、分銅の重量、相対速度、修正量等が決まっているならば、修正時間が設定できる。

ここで重要になったのが平行度測定、円板状工作物の板厚偏差の測定であった。市販のダイヤルゲージや電気マイクロメータを用いる場合の鏡面に仕上がった平面載物台では、工作物との間に塵埃が挟まり、その存在によって正確な板厚測定ができなかった。そこでベアリングボール3個で構成する載物台を提案し、加工現場でも使用できるものにした。ラッピング・ポリシングによって板厚偏差 $0\mu\text{m}/\phi 60\text{mm}$ を得て、さらに鏡面研磨面の両面からの反射光の等厚干渉縞の縞数0によって確認した。

結晶部品製作では、研磨面の結晶方位誤差が問題になった。水晶振動子などAT板やBT板の計測用に既に専用のX線デフレクトメータが普及していたが、さまざまな光学結晶の例えばa面、b面、c面などを加工するような場合、結晶方位誤差については、そのまま利用できるようなものではなかった。そこでX線背面ラウエパタン撮影を行い、そのパタンの幾何学的関係をもとに測定誤差を求め、改善を図った。測定システムは、通常のX線源を横に寝かせ、上方に向けた放射するX線ビームを、ノズル、専用のポラロイドカメラ、載物台の穴を通し、載物台に設置した結晶表面からの反射回折パターンをそのカメラで撮影する構造である。**図5.4**はその構造と修正研磨ジグである。ここでも載物台と研磨した結晶表面の間の塵埃が問題になった。金属の載物面を#320といった粗粒でラッピングを行い、次いでピッチポリシングで平面に仕上げ粗面の凸部を適当に取り除き、塵埃の逃げ場になる表面粗さの谷部を残してこの問題を解決した。このようにして製作した縦型X線背面ラウエパタン測定装置とラッピングによる結晶方位修正研磨ジグや平行度修正と一体化を進め、結晶方位誤差は6分以内であることが確認でき、当時の定方位切断による方位誤差2度からこのように大幅に改善することができた。

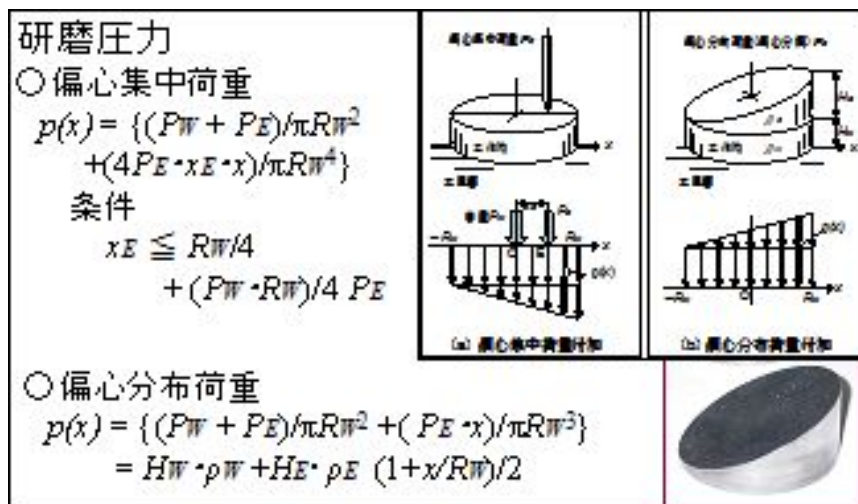


図5. 3 平行度修正研磨のために偏心荷重

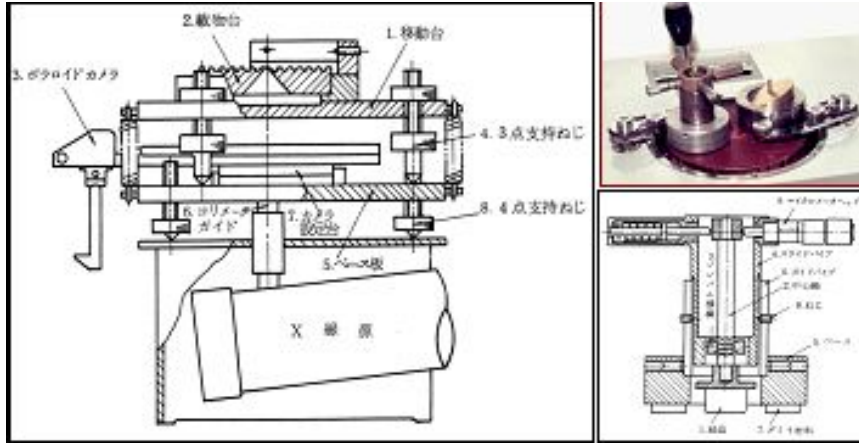


図5.4 縦型X線ラウエパタン測定装置構造と結晶方位修正研磨ジグ

4.3) 研磨における段差発生について

電気光学素子を製作した際に、結晶の外周にガラスダミィを配置してポリシングを行うと結晶が突き出して凸状に研磨されたことを述べてきた。まさに異種材料で構成された工作物を研磨したとき、材料間の加工量差によって段差が発生することに直結する検討課題であった。その後、これはフェライト、セラミックス、金属薄膜などで構成される磁気ヘッドの研磨におけるこれらの材料間の段差の僅少化にも関係した。CMPにおけるディッシングやエロージョンとも少なからず関連をもつことになる。**図5.5**は、2種類の比例定数 η_{w1} 、 η_{w2} をもつ工作物の軟質工具によるポリシングの加工量差が一定になったときのモデルである。比例定数 η と弾性変形定数 ξ によって段差が決まる。理論と実際がよく対応し、1980年の精機学会賞を受賞する機会にもなった。その後、 n 種類の $\eta_{w1} \sim \eta_{wn}$ をもつ工作物の同時研磨の段差を求めるまで発展させている。

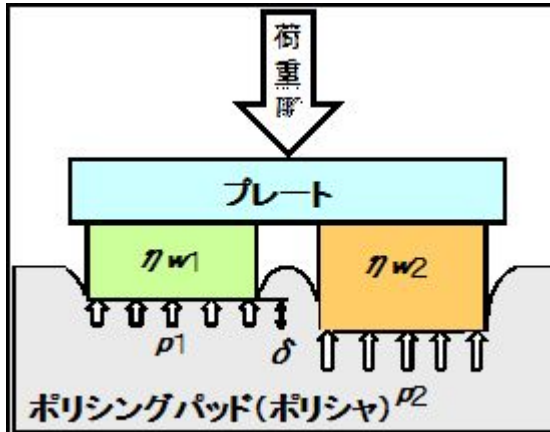


図5.5 異種材料の同時ポリシングにおける段差発生モデル

4.4) 平面研磨について

オプチカルフラット級の平面をピッチポリッシングで仕上げる小型修正輪形研磨機が完成したところで、なぜ平面が仕上がるのか、新たな研究課題にした。世の中にはレンズ研磨機の運動解析など理論的な扱いはあるが、実際の研磨と対比させるところまでは進んでいない。一般に加工に関連する理論的扱いについても数多く目にしたが、実際と対応させることなく終わったものも少なくない。筆者は、初期の工作物の平面度や工具の平面形状がそれぞれの任意の点の時々刻々算出される加工量、工具摩耗量が一体となって変化していくものと考えていたので、実証の容易な単純なリング工具と円板工作物の関係で、両者を同一回転にして全面で相対

速度が一定にする特解とも言える条件下で検討を開始した。図5.6は、理論的扱いについて説明するためのモデルである。当然、両者の幾何学的関係をもとにした運動解析と時々刻々変化する両者の形状から導出される圧力分布解析との一体化が必要になる。両者の間には研磨剤が存在し、それでいて両者がなじんだ状態で密着し、パッドの弾性変形量から得られる圧力分布の総和は、工作物に付加した荷重に相当する。パッドは温度変化によって軟化も考えられたが長時間にわたる研磨では一定温度に落ちつくなど幾つかの仮定も置いた。弾性変形定数の η については、当時、ヤング率に置き換えるべき意見もあったが、ピッチの変形特性に針入度が採用されていたこともあり、実際の研磨時の工作物の形状変化をもとにし、圧力当りの弾性変形分を用いた。なお、研磨の理論的扱いで必要になると、 η_w 、 η_t などの準備では、今回のはじめにも触れたように、不慣れな実験者による再現性の乏しいデータから求めることには注意したい。

小型修正輪形研磨機は、ピッチポリシング用に最初に提案してから改善を経て、第8世代まできた。口径の大きい修正輪形研磨機も含めると第10世代になり、最近のものは動圧軸受けを採用している。図5.7は、これまでにピッチポリシングで平面に仕上げたガラス円板や光学結晶素子の平面度を示す等厚干渉縞の一例である。

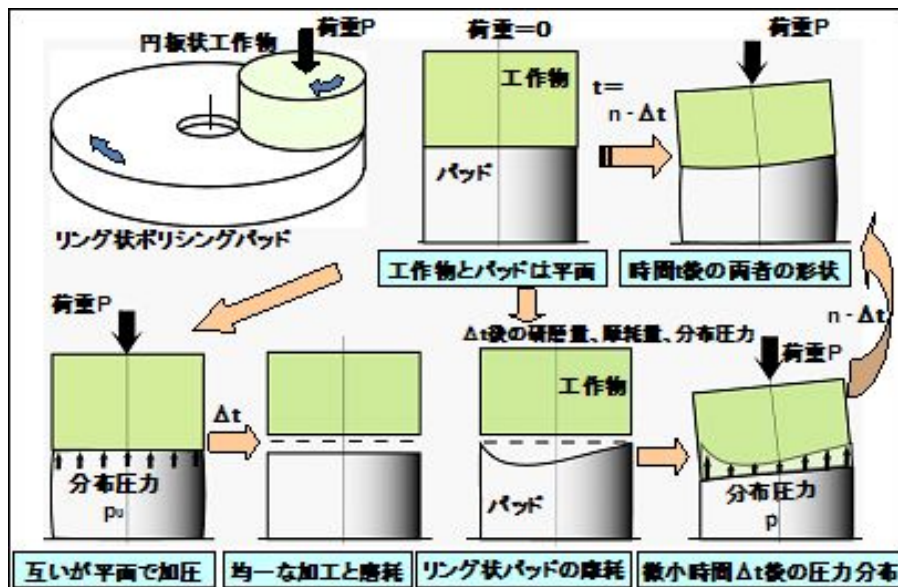


図5. 6 円板工作物とリング工具によるポリシングの理論的扱いの説明モデル

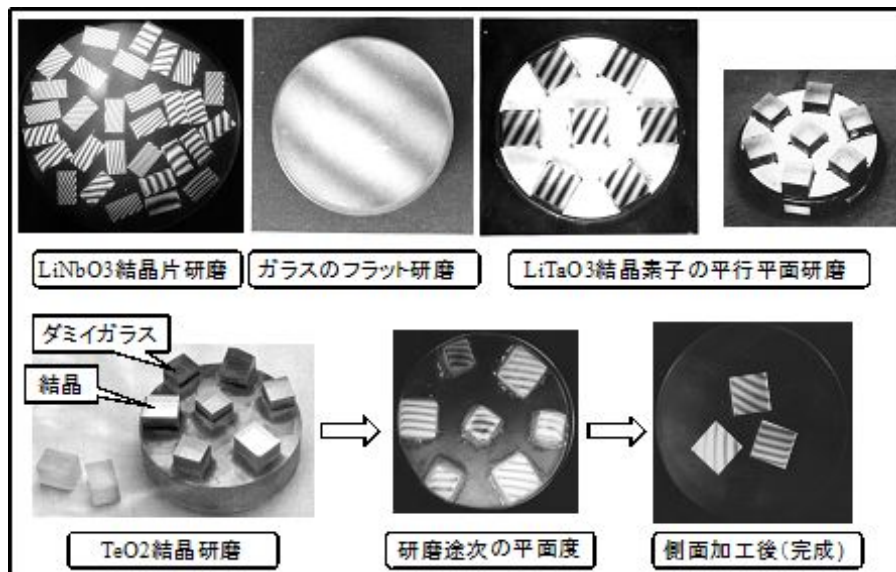


図5.7 ピッチポリシングで仕上げた結晶素子等の平面度

5) 終わりに ～埼玉大学ベンチャーを設立して6年経過して～

本機による平面研磨の対外的な技術指導は、NTT通研時代から始まり、埼玉大学・東京電機大学時代、さらに(株)河西研磨技術特別研究室になっても続けてきた。最近では、高度研磨技術研修として「ポリウレタンパッドとピッチポリシヤを用いたポリシングによるオプティカルフラットおよびオプティカルパラレルの作製」あるいは持参工作物による「高精度結晶素子研磨・製作」のテーマで4日間かけ、マンツーマンの実技研修会を開講している。当研究室は、埼玉大学ベンチャーのひとつとして2007年に設立し、それ以来、当大学内の地域オープンイノベーションセンター内を活動の場としてきた。これまでに蓄積してきた研磨技術をもって世の中の企業の要請に応えることにし、研磨に関する問題解決で助言から具体的検証まで請け負うほか、技術コンサルタント、技術講演、技術指導等を行っている。上記の高度研磨技術研修(A)、のほか高度研磨技術研修(B)の「研磨理論」を元防衛大学の宇根篤暢教授と協力のもとで進めている。

研磨について新たに考えていかなければならない問題がある。例えば、産業界全体に課せられている環境保全、省エネルギー、省資源の問題である。砥粒加工・研磨の分野では、十分な検討が進んでいないようにも思える。どのように対応すべきか、加工条件や加工システムなどに新たな検討課題が存在する。

また、研磨に関する高度の技能・技術を持つ技能者の高齢化が進む一方でそれを引き継ぐ若年者人口が減少し、そのうえ若者の高学歴志向などがあって重要と思われる技能・技術の退化が心配されるといわれて久しい。それでも我々は技能の技術化を進めていかなければならない。仮に年配であっても、若さを取り戻して五感を研ぎ澄ませ、多少でも技能・技術を身に付けたならば微に細にわたって分析を進め、加工条件と加工結果の間の因果関係を明らかにし、それをもとに改善や工夫を巡らし技術化を進めることを希望する。高性能測定装置類を準備し、評価・分析に活用することは重要である。研磨は技能の固まりのように言う人もいる。五感を研ぎ澄ませることや心の置き方には個人差もある。それでも研磨に係わり、技術として紙面に書き表す努力、それを後輩に伝えていくことが技能の技術化の前進になる。確かに技術が奥の深い技能に支えられているのが研磨の特徴である。筆者も研磨に携わった約50年前はずぶの素人であった。経験を通して技術として積み上げてきた。ピッチポリシングは、高速、高圧の研磨条件による時間短縮が難しく、そのうえ通常の光学部品製作の場合に過剰品質に仕上がる無駄があり、量産現場では硬質ウレタンパッドによる高能率ポリシングに置き換わった。しかし、ピッチポリシングによれば、最高の品質、精度に仕上がる特徴をもつ。そこにある幾つかの煩雑さを克服して高度の研磨を実現していく努力、研究心、向上心をもつことは研磨技術者にとって重要なことと考える。(株)河西研磨技術特別研究室は、当研究室特有の研磨実技経験を通して企業の人材育成に貢献し、また、古くからある研磨法、特にピッチポリシングとその周辺の技能・技術を順次改善していく状

況をお伝えし、企業における研磨技術の差別化のお手伝いをしたいものと考えてきた。