

■第3話 研磨加工に携わって50数年

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

前回までの2報で研磨の歴史と特殊性などを取り上げてきた。今回は筆者が研磨を研究対象にすることになった経緯と当時の研磨の状況に順次触れることにしたい。

1) 学生時代における研磨との出会い

出身地が水晶等の研磨関係企業が多かった山梨県甲府市ということもあり、研磨との出会いは意外と早かったと思っている。

第二次大戦後の復興期の頃、小学生であり近所にある家庭工業規模の宝石研磨工場の簡易建物によく出入りした。瑪瑙のカフスポタンの凸楕円面の研磨現場を目にただけでなく、半分遊びで研磨をさせてもらった。ドライ盤の回転溝付き工具はフェルトだったか桐板だったか明確な記憶はないが、それに水に分散した酸化クロム研磨剤を与え、竹箸の先に貼り付けた瑪瑙片を工具の溝に押し付けて鏡面に研磨することを経験した。手が酸化クロムで緑色になり、爪の部分の色が数日とれなかったことを覚えている。

山梨大学工学部機械工学科の学生時代、機械系や材料系の学生であれば誰もが経験されたと思うが、3年次のとき金属組織の検鏡やマクロ観察の学生実験があり、ペーパーヤスリで加工した粗面を琢磨機によって鏡面に仕上げていく金相学的ポリッシングを行う機会があった。フェルトパッドと酸化クロム砥粒による炭素鋼の鏡面研磨、 γ -アルミナ砥粒を用いる軟質なアルミニウム合金の鏡面研磨も経験した。さらに、簡単な研磨機を用いるガラスのラッピングとその面を触針式表面粗さ測定機を用いて表面評価を行う実験があった。そのときの指導教官は谷口紀男先生と織岡貞次郎先生であり、機械工場実習の金属加工に加え、硬脆材料を対象にしたラッピングが経験できたことは幸いであった。また、4年次の卒業研究では、谷口先生のご指導のもと、「砥粒噴射によるガラス切断の研究」を行った。前年度まで高圧空気を用いる砥粒噴射であったものを高速回転する羽根車から遠心力で砥粒を噴射させる方式に代えて切断速度を高めた。研究室では、既にラッピングは試料準備のために日常使う身近な加工法になっていた。また、手作りの高速回転羽根車の静バランスをとるために2枚の平行バーを自作した。その際、平行バーを真直に仕上げることに必要になり、キサゲされた平面鉄定盤にベンガラを介して手で擦り付けることによって必要な精度を転写できることを経験した。

2) 山梨大学助手時代

研磨に関する研究を始めたのは、1963年の大学助手になってからのことである。学会等の学術講演会では、切削に関する研究発表が盛んに行われており、最先端の研究として砥石を用いる研削が注目されていた。上司である指導教官が研削理論に確率論を取り入れた織岡貞次郎先生であったこともあり、先生のご指導のもと、「アルミニウムの研削加工における目づまりに関する研究」をメインテーマに選び、研削の研究を目指していた。一方研磨については、地場産業として甲府周辺には水晶振動子基板や様々な半貴石の研磨業界があり、それらの業界と交流もあったので「ガラスの研磨の研究」をサブテーマに位置づけていた。

当時の研磨は、ポリッシングになると工具にピッチポリシャを用いるのが一般的である。鏡面仕上げに優れるが加工のメカニズムが明確でなく、これは摩擦・磨耗などと同様に研究として扱い難い分野とされていた。その研磨の研究にあまり抵抗なく飛び込むことができたのは、上述のように子供のころから研磨との触れ合いがあったことによるのかも知れない。しかしよくよく考えてみると研究に着手するには、まさに「ずぶの素人」であった。

研究室の設備は、レンズやプリズムなどのガラス研磨企業のオスカー式レンズ研磨機と同一機構をもつ古い研磨機であり、下皿回転、上皿円弧往復と下皿につられる上皿の従動回転で工作物と工具を擦り合わせる方式のものである。研磨機入手の際に付いてきたと思われる上皿、下皿を利用することにしたが、回転数、揺動数、圧力、かんざしの位置などわかるはずもない。県内外にあるガラス研磨、水晶

研磨などの研磨工場を訪れ、研磨状況を見学するとともにそれらの情報を得た。しかも大学敷地内に山梨県立研磨工業試験所(現山梨工業技術センターの研磨部門)の実験場があったことは幸いであった。宝石研磨、水晶研磨などの経験豊富な大学先輩の近山晶技官の研究室を訪れることができ、通常研磨のほか新しい研磨方法に挑戦していることを目にした。そのなかにはレンズ研磨機を用いることなくカーブジェネレータだけで研磨剤多量供給のもとでレンズの高速鏡面仕上げを可能にしており、現在にも通じる技術ができあがっていた。また海外の高速研磨調査をもとに同様な研磨法で数個のレンズの同時研磨を提案された機械試験所(現産業総合技術研究所)の石田泰弘様の取り組みも明らかになり、研磨の研究の面白さを知ることができた。

それでも企業のレンズ研磨機を用いる加工現場では、旧態依然とした研磨条件が採用されていた。ピッチポリシングに用いる砥粒がベンガラ使用から酸化セリウム使用に変わったといっても研磨剤の供給法については、今日のような連続・多量供給でなく、研磨剤容器の上澄み部分の低濃度・微細砥粒の研磨剤を筆や刷毛に付けて僅かに供給する方法をとっていた。品質の高い鏡面と精度を仕上げるためであり、乾燥寸前の状態になったところで研磨を終了する条件をとるのが普通であった。

カメラ工業界は、第二次大戦後の日本の産業界の復活の一端を支えており、ガラスレンズ等の研磨は重要な加工技術のひとつであった。研磨の研究に着手した当時、この業界の成長期にあって国内に多数のカメラ会社があり、ライカなどドイツカメラに追い付け、追い越せとばかりに各社は、技術向上に躍起になっていた。業界の要望で設立されて順次名称を変えて各時代の問題をとりあげてきたカメラ工業技術研究組合、光学工業技術研究組合(現(一般社団法人)日本オプトメカトロニクス協会)のガラス研磨研究委員会のなかで学側の主要委員に谷口先生、織岡先生がおられた。小生も例会に参加するようになり、日本の研磨技術の現状や問題点を把握する一方、レンズ研磨機によるガラス研磨も順次身に付き当委員会から研磨実験等を委託されるまでになった。

2.1) ポリシングにおける加工量と工具磨耗量

研磨の研究としては、従来のオスカータイプのレンズ研磨機使用のもとで研磨時間の短縮を目指し、高速・高圧研磨を取り上げた。砥粒やパッドなどの研磨資材の選択が重要であったが、現在ほど豊富ではない。ピッチに代わる工具材料としてポリウレタンパッドもない。しかし既に様々なプラスチックが入手できる時代である。当研究室では、カメラ工業研究組合の補助を得て雰囲気温度と硬さの関係などそれら材料特性の検討を済ませていた。なかでもピッチに近い工具材料としてはPMMAが優れ、硬さの調整に共重合材のPBMAの適度の混入がよいという研磨結果を出すまでになっていた。しかしこの種のプラスチックには吸湿性があり、乾燥すると反り生じるなど問題も指摘してきた。

レンズ研磨機を用いるガラス研磨では、このPMMA工具と酸化セリウム砥粒を用い、砥粒濃度、研磨液種類や粘度のほか、研磨速度、研磨圧力などを変化させて研磨特性を検討した。鏡面の品質については、NF粗度計を用い、レンズ研磨会社でピッチポリシングを行ったガラス面を標準試料にし、45°入射光の全反射率と実験で研磨したガラス面の同様な全反射率を比較するといった光学的な評価を行った。また、加工量については、ガラス面にビニールテープでマスキングを行ってフッ化水素水溶液で浅い溝を付け、研磨の進行によるその深さ変化を触針式表面粗さ測定機で求める方法をとった。特に問題になったのは、高速・高圧条件でレンズ研磨機を用いた場合に、研磨運動が複雑であるので所定の研磨速度と研磨圧力によって研磨することができず、整理したデータにばらつきが生じたことである。すなわち速度については下皿回転と上皿往復運動から算出される平均速度を用いざるを得ない。また、上皿の往復運動の死点において異常回転、異常圧力が発生するがそれらも無視せざるを得なかった。

このようなデータのばらつきを避けるために複雑運動のレンズ研磨機使用から、単純回転運動のリング状工具研磨機使用に切換えて実験を行うようにした。研磨機の製作には、上記の研究組合の補助ならびに研磨機メーカーの大学先輩の今橋孝弘社長に負うところが大きかった。

研磨実験の再現性が高まり、図1は、円板状BK7ガラスとPMMAリング状工具を用いてポリシしたときの加工量と工具磨耗量の変化を求めた結果である。ラッピン

グを終えたばかりの曇ガラスからポリシングを開始したとき、当初は加工量が小さく工具摩耗量が大きい。ポリシングが進んでガラスが鏡面になると反対に加工量が大きく、工具摩耗量が小さくなり、これは安定状態として長く続く。このリング状工具の研磨機はその後の小型修正輪形研磨機になり、光学結晶部品研磨に利用できたほか、研磨の理論的扱いでも実証機として用いられることになる。

高速・高圧の研磨条件に見合う新しいポリシャあるいはポリシングパッドについては、現在の硬質ポリウレタンパッドが市場に出る前のことでもあり、通常のプラスチックはピッチに代わるものとして生産現場で受け入れられるものではなかった。ピッチポリシャに置き換わる本命と見られたものがフェルトにセラックや松脂を含浸させたパッドである。加工量も大きく、一方磨耗量が小さく、お湯で加熱するだけで球面状に曲げることが可能であるなど生産現場での普及が期待された。しかしもなくポリウレタンパッドがあらわれ、消える運命にあった。フェルトに代わってPETファイバー不織布を用い、ポリウレタンを含浸させた市販パッドは、このフェルトーセラック・松脂含浸パッド構造をヒントに作られたものであろう。

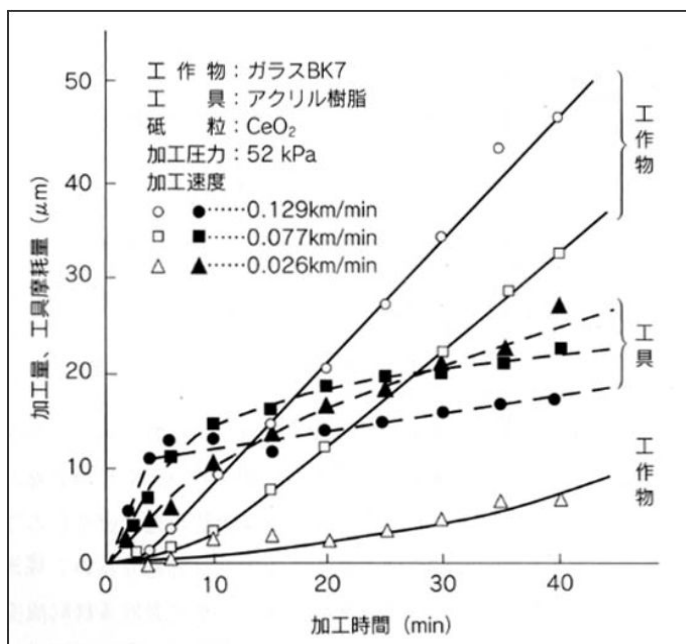


図1 ポリシングにおける加工量と工具磨耗量

2.2) 研磨量・工具摩耗量の比例定数

ラッピングによる曇りガラス状態からポリシングを行うと、図1に示したようにラップ痕が消えた頃から加工量が時間に比例して直線的に増加する。これが工作物と工具の相対速度や圧力とも比例関係にあることを実験で明らかにした。さらに遊離砥粒による研磨であるので工具側に対しても同様に作用し、ポリシングだけでなくラッピングにおいてもこの関係が成立することも明らかにした。

研磨量 hw 、工具摩耗量 ht 、速度 v 、圧力 p 、時間 t とおくならば、

$$hw, ht = (\eta_w, \eta_t) v \cdot p \cdot t \quad (1)$$

で表すことができる。比例定数 η_w 、 η_t については、走行距離と圧力の単位を残し、「比研磨量・圧力比 $\eta_w (\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} / \text{Pa})$ 、比工具摩耗量・圧力比 $\eta_t (\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} / \text{Pa})$ 」と定義した。この取り決めについては、上記の研究組合のガラス研磨研究委員会に提案し、検討をいただいた。そのときの主要メンバーには、谷口紀男先生、木下是雄先生、今中治先生、小川智哉先生ほか企業の名だたる方々がおられた。この式は、将来、平面度など形状変化を算出していくうえで基本式になった。

なお、ポリシングにおける研磨量とこれらの比例関係については、1927年のPrestonのフェルトポリシングパッドによる天体望遠鏡反射鏡の研磨機設計に関する論文のなかでも扱われており、現在、多くの研究論文等で引用される。

筆者等は、砥粒が遊離状態にあるので工作物だけでなく工具にも、また、ポリシングだけでなくラッピングにも同様に全く同じように扱えることを明らかにした。その

後、トライボロジー分野でもアブレイシブ摩耗が提案されると、「比摩耗量(1/Pa)」が用いられるようになった。上記の比工具摩耗・圧力比と次元は同一である。

レンズ研磨機からリング工具研磨機に換え、研磨条件と加工量の間の再現性を高めて式(1)の関係を導くことができた。これを研磨の理論的扱いに展開させることに気持ちも動いた。しかし研磨に携わって5年目であり、まだ形状等の精度を仕上げていくうえで必要な見識は備わっていない。それまでのところ研磨で光沢を持つ鏡面に仕上げることはそれほど難しくなく実行できた。しかし同時に高精度平面に再現性よく仕上げるとなると、経験も浅く、できるものならばその技術を身につけたという思いに駆られた。

高精度のピッチポリッシングについて手をとって詳細に教えてくれる人は周囲にいない。そこで県内の光学部品メーカーの社長に技術指導をお願いしてみた。その社長は研磨の経験があり、自作の四角形のオプティカルフラットの2枚セットを見せながら研磨の世界の難しさを説明された。社内には技術面で社長以上の実力者がいて社長にも手が出せない部分がある。工場社員の技能教育でも序列も無視できない。研磨技能は、五感を研ぎ澄ませて身に付けていくもので個人差があり、簡単に身に付くものではない。企業は研磨技能の伝承をスムーズに進めるシステムをもっていて、生産活動を進めるなかで技能が身に付けていくような体制をとっている。特にピッチポリッシングにおける加工精度に関しては、大学の研究テーマとすることは極めて困難と思われるので企業に任せておいて欲しいと言われ、この種の技術指導の件は体よく断られてしまった。

ピッチポリシャの製作についても、それまで全く経験がなく、独自で作る知識もなかった。そのときポリシャの製作をお願いした。鉄鋸の歯を用いる筋目状の簡易な網目の製法によるものであった。摺り合わせ定盤が必要であり、これは自作するのが普通であると言われた。現実のところ、ポリッシングに使用しなくても時間とともにその浅い筋目が消えてしまい、ピッチポリッシングを経験することなく終わってしまった。

山梨大学から日本電信電話公社電気通信研究所に移籍したのが1968年3月である。当研究所では、LiTaO₃単結晶を我が国で最初に育成し、それを光変調素子に加工してガスレーザ光を用いる空間伝播で光通信を行うプロジェクトが既に立ち上がっていた。この結晶の素子加工を著名の研磨関連企業3社に委託してきたが、各企業とも高品質・高精度形状の研磨ができずギブアップしていた。そこで研究所内に早急に対応すべく超精密結晶研磨プロジェクトを立ち上げたところに配属となった。筆者にとってこれまでの経験を活かす新たな研究の場になった。

3) 日本電信電話公社 武蔵野・茨城電気通信研究所時代

NTT電気通信研究所では、1968年から1982年までお世話になり、1979年には研磨に関する学位(東京大学:高精度平面形状加工に関する研究)を取得する機会をもつことができた。研究所入所と同時に指導いただいた井田一郎先生は、海底同軸ケーブル中継器用の140MHz帯水晶発振子基板の製作を可能にした方で、ポリッシングに関しても我が国の第一人者であった。直ぐにLiTaO₃単結晶光変調素子製作の必要性、技術的な問題点などのほか、11月の研究所公開の光通信システムに間に合わせるためには早急に素子製作に着手することの重要性について説明を受けた。また井田先生の計らいで、高精度研磨については未熟の筆者にピッチポリッシングによる高精度平面研磨技術を習得する機会を作っていただいた。

3.1) レンズ研磨機を用いるピッチポリッシングの実習

技術指導を受けた東北大学科学計測研究所の研磨工場、古くから培われてきた研磨技能・技術を頑なに守ってきており、オスカー形研磨機、ピッチポリシャ、ベンガラ研磨剤を用いる高品質・高精度のポリッシングによって科学計測研究所の光学の研究を支えていた。構成員5、6名と少人数である。実習期間中はその方々に代わって早朝に床のモップ掛け、次いで平面基準になる鋳鉄皿の摺り合わせ作業を行った。実習ではレンズ研磨機を用いるピッチポリッシングで高精度を確実に仕上げていく技能・技術を身につけることに集中できた。

指導担当の阿部千弥技官は、著名な光学メーカー出身者であり、しっかりした技術の持ち主で、名人気質、寡黙な方でもあった。全てについて手取り足取りで詳細説明するのではなく、基本的な技術説明のほかは質問にも最小限の応えだけであった。レンズ研磨機の研磨の状態とその調整の仕方を目で見て頭と体で捉えていく

といった独特の指導方針のもとで教えていただいた。レンズ研磨機の上皿の中心を抑えるカンザシの位置とその振り幅については、研磨途次の平面度測定の結果に基づいて名人が適正位置に設定する。名人が席を外すと筆者は設定位置をわざと僅かにずらす。名人が再び研磨機の前にきたときには、そのズレに気付いて直す。なぜかと聞いても笑っているだけ。このようなことを幾度か繰り返しながら研磨機調整を通した無言の会話を進めた。短い期間であったが、平行平面板ジグ・直方体ブロック・直角プリズムのレンズ研磨機によるラッピング・ポリシング技術、ピッチポリシャの製法、ガラス製直定規製作、バルサム貼り、各種ピッチ団子による接着法のほか、ラッピング砥粒の分級再生、鋳鉄ラップの3面摺りの経験などを行うなど、非常に密度の高い実習ができ、矢野昂郎先生、田中一工場長にもたいへんお世話になった。

3.2) LiTaO₃単結晶電気光学素子の製作とその後の技術展開

研磨実習を終えて研究所に戻り、井田一郎先生の体制下で電気光学素子の製作が始まった。最初の研究テーマ名は「LiTaO₃単結晶電気光学素子の超精密研磨の研究」である。研究は、単なる光学素子の製作だけでない。「研磨にはArtで表現されるところが極めて多い。それをTechnologyに変えていくことも使命である」。研磨の技能の技術化を特に意識するようになったのはその頃からである。

まず、素子加工の準備としてレンズ研磨機を始め、ピッチ、鋳鉄皿、研磨砥粒、純水装置……など必要なものを整え、素子結晶を貼り付けるジグとしてのφ60のガラス円板をオプティカルパラレルクラスに仕上げる研磨実習の復習から始めた。かなりの数の研磨ジグを製作したはずである。LiTaO₃単結晶については、担当研究室で24時間体制を敷き、チョクラルスキー法を用いて結晶育成を行っていた。育成条件の適正化が進んでいなかったこともあり割れや欠陥が多発し、親指程度の大きさで良質な結晶を入手するまでに結構の日にちを要した。従ってガラスや水晶のブロックを素子結晶に見立てた加工の練習を行い、研磨技術の改善・向上を図った。一方、素子研磨時に必要とするダミ用屑結晶、さらには基本的なラッピング特性やポリシング特性を把握するための結晶等も直ぐに手に入らず当時は結構の焦りを感じていた。

11月の研究所公開までに数回しか素子試作を行うことができなかった。しかし、これまで蓄積してきた技術を駆使して完成したLiTaO₃単結晶光変調素子は、所定の形状精度に仕上がりと、性能を十分に満たすものであった。現在容易に入手できる光ファイバーや半導体レーザがない時代のことである。本素子とガスレーザを用いた光通信システムで霞ヶ関ビルと森ビルの間を数ヶ月にわたる昼夜連続カラーテレビ信号の空間伝播実験を行った。この成功は国際的にも高く評価されてIEEEで表彰された。その一端を担うことができたことは本当に幸いであった。

ところで上述の結晶素子研磨だけでなく研磨の基本技術についても検討を進めた。それまでは、図2のようなオスカータイプのレンズ研磨機を用いるピッチポリシングでガラスのオプティカルフラットを再現性よく仕上げることは、素子加工を進めるうえで必要であると単純に考えていた。しかし数少ない結晶や研磨面積が小さい結晶を高精度に研磨で仕上げることは容易でないことがわかってきた。結晶の回りを加工特性の異なるガラスダミイなどで囲んだ状態で研磨を行うと、結晶とダミイの間に加工量差が発生して結晶が突き出し、平面でなく凸面に仕上がってしまう。筆者が入所する前にギブアップした3社による研磨面のいずれも凸面であり、しかもラップ痕も残存していた。ラップ痕を除去するために常識の10倍の時間を掛けて研磨したところ、ラップ痕は皆無に仕上がるが、形状精度はひどい凸面になった。どうもダミイ材料の問題と研磨機の問題が絡んでいるとみた。



図2 レンズ研磨機による結晶研磨
(中央部は結晶、外側はブロック状ガラスダミイ)

レンズ研磨機は各種の球面研磨に適用できる多機能機である。平面研磨専用機を用いたうえでダミイ材両問題を解決すべきと考え、レンズ研磨機から別の研磨機使用に切り換えることを提案した。東北大学の研磨工場で実習を終えてまだ3ヶ月しか経っていない。指導者や周囲の研磨研究者からは同意が得られなかった。レンズ研磨機によるピッチポリシングを身に付けてきた筆者は、むしろそれらの技術を研究所に定着させる立場にあり、新たな研磨機に手を出すことが許されないということであった。一方11月までには高品質・高精度の研磨技術をもって光変調素子を製作しなければならない焦りがあった。既に異種材料によるモデル研磨でレンズ研磨機ではかなり無理があるのではないかと思い、図3に示すようなレンズ研磨機に簡単な部品付加だけの新研磨機の準備が進めてあった。これは大学助手時代に経験したリング工具研磨機に修正輪を付加した小型修正輪形研磨機のはしりである。小生に代わってその研磨機を使って検討する人もいなかったのも、周囲が帰宅した17時過ぎからその研磨機による平面研磨の可能性の検討を行った。リング工具をピッチポリシャにし、工具と修正輪の面積比、工具と工作物・修正輪の回転比の選択がよかったこともあり、短期にオプティカルフラット級の平面研磨を実現した。もちろん周囲の反対もなくなり、素子加工に利用して好結果を得ることができた。

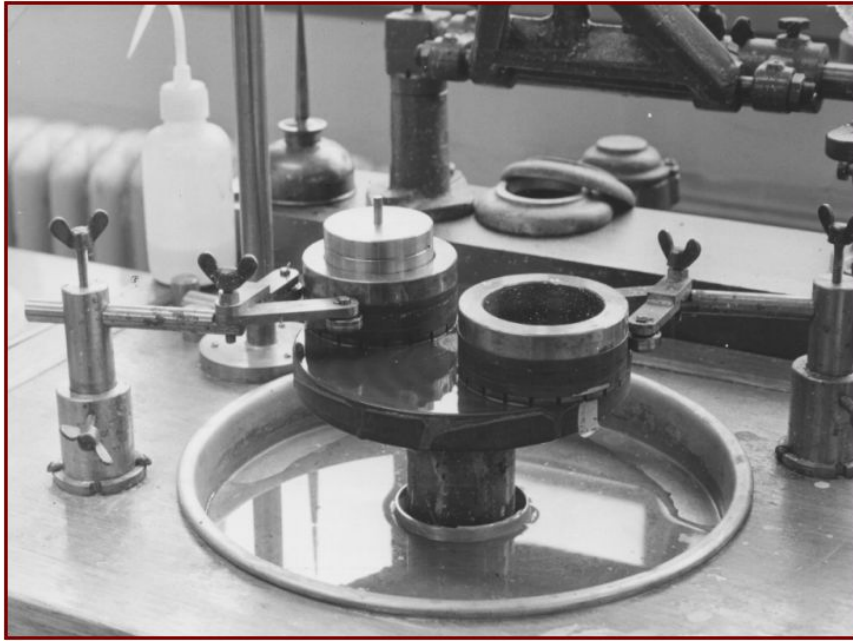


図3 レンズ研磨機に簡単な部品を付加した修正輪形研磨機

このように平面研磨が可能になると小型修正輪形研磨機の装置化、新たなダミイ材料の使い方、次に平行度の測定・修正研磨法、結晶方位の測定・修正研磨法、研磨のための結晶の非加熱接着法、加工変質層……などの検討と併せて超精密な研磨技術を確立した。図4は、その後レンズ研磨機を改造した小型修正輪形研磨機である。また試作したLiTaO₃光変調素子を図5に示す。加工変質層の評価検討もあって性能を満足する素子製作の歩留まり90%以上を実現し、外部企業3社に技術移転を行うまでになった。また、小型修正輪形研磨機がなぜ平面研磨に優れるのか理論解析を開始した。

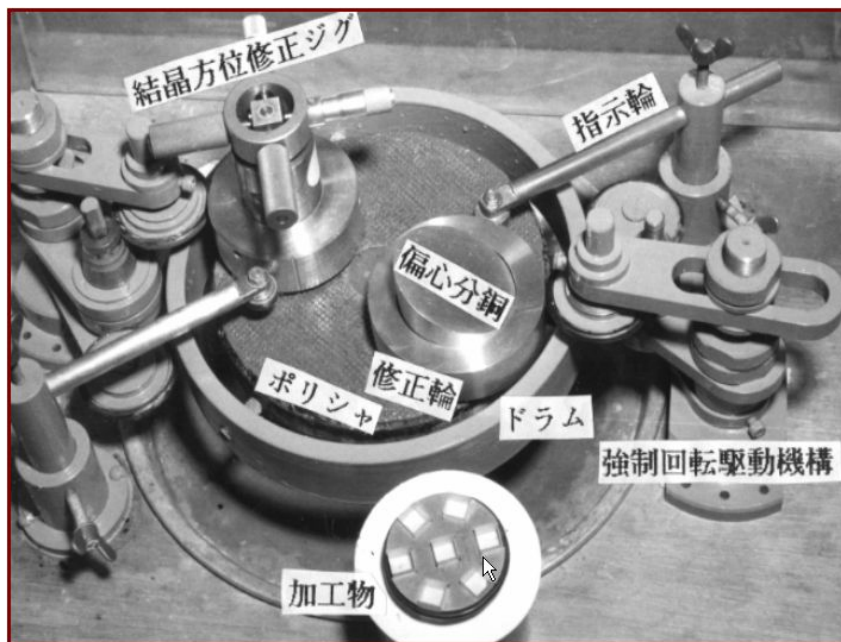


図4 改良した小型修正輪形研磨機

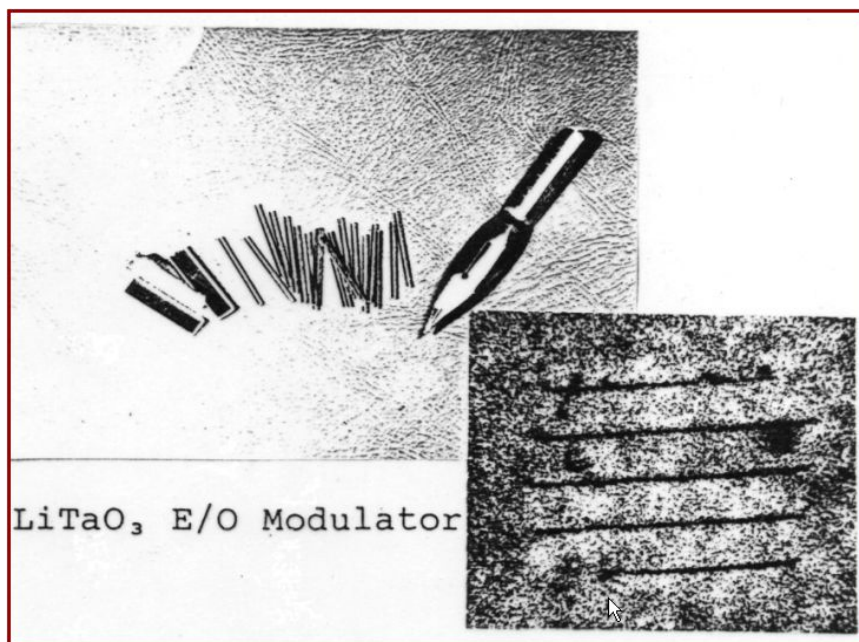


図5 試作したLiTaO3単結晶光変調素子

この研磨技術は、軟質なTeO2単結晶超音波光偏向素子製作のほか、水晶やLiTaO3単結晶薄片フィルター基板、LiNbO3単結晶ウエハの製作、SiウエハやGGG基板研磨実験、14“や18”径の磁気ディスク基板の製作などに適用することになる。

筆者のこのNTT時代に、世の中の研磨には著しい変化や飛躍があった。我が国に超精密加工が紹介されたのは1960年代後半である。当初は、「超精密」を単純な形容詞と捉える人がいたり、また極限に近い加工品質と精度を、経済性を度外視し、精魂を込めて加工することなど様々に解釈されていた。しかし、海外視察などによってこの加工の理解を深め、我が国では民生用に応用分野を急速に広げた。それらのなかで半導体デバイスのICやLSI製造を可能にするプレーナ構造・技術が1958年に提案されており、超精密研磨を行ったシリコンウエハの大量需要も予想されていた。ガラスなどの光学ポリシングは、既に成熟期に到達していたが、それをシリコンウエハ研磨に適用したところスクラッチや加工変質層の発生などがあって不適切であった。これを解決したのがコロイダルシリカ研磨剤と軟質発泡ポリウレタンパッドを用いる湿式メカノケミカルポリシングである。この湿式メカノケミカルポリシングと従来の光学ポリシングで得た鏡面品質の比較やそれぞれの研磨における材料除去のメカニズム分析などが行われ、超精密研磨を可能にする条件や新研磨法の提案が行われるようになった。

液中研磨、EEM (Elastic Emission Machining)、フロートポリシング、非固体接触研磨、湿式および乾式メカノケミカルポリシング、ハイドレーションポリシング、ハイドロプレーンポリシング、FFF (Field-assisted Fine Finishing)、P-MAC ポリシング (Progressive Mechanical and Chemical Polishing)、電解砥粒研磨などは、材料除去メカニズムに特徴をもち、超精密研磨に類するものとして研磨装置とともに具体化されるようになった。筆者の光学ポリシングの流れを汲む研磨は、超微細砥粒、新製法のピッチあるいはワックスポリシャ、微塵研磨環境等の採用によって名実ともに超精密ポリシングになった。

4) 埼玉大学時代・東京電機大学時代

1982年3月に埼玉大学の機械工学科機械工作研究室、小林昭教授のもと助教授として赴任した。定年退官までの20年間のうち5年間助教授、15年間教授を務め、様々な研究を自由に行うことができた。

研磨は、固体材料であればほとんどのものにも適用できる。このようなことから軟質な漆塗布面から硬質なダイヤモンドに至るあらゆる材料のラッピング特性やポリ

シング特性を把握することを目指すことにした。とは言っても組織的にデータベースを作ったわけではない。外部企業などから持ち込まれた材料の研磨を手掛け、許されるものは研磨特性として蓄積してきた。例えば、各種光学ガラス、各種金型用鉄系金属、CMP対象の配線金属のAl、Mo、Cu、非晶質のカーボンや無電解ニッケル膜、ファインセラミックスのSiC、Si₃N₄、ZrO₂、アルミナ、フェライトなど焼結材料、サファイヤやダイヤモンドのバイト刃先やYAG、ルチル、有機光学結晶、古代鏡組成の各種青銅、……などがある。

また、高品質、高精度の研磨の技能・技術についても整理してきたが、これについては次報以降で述べることにしたい。

新しい超精密研磨法として、Ⅲ－Ⅴ族半導体のGaAsウエハやⅡ－Ⅵ族半導体などのウエハを対象にP-MACポリッシング(Progress Mechanical And Chemical Polishing)を提案してきた。これはBr-メタノールを用いる化学研磨に類し、砥粒を用いることなく粗面から鏡面へ、さらに無擾乱面へと仕上げていく研磨である。ウエハとパッドの状態が接触条件から準接触条件、非接触条件と移行するなど、化学的材料除去に機械的摩擦作用を変化させることを特徴としている。この研磨法は無酸素銅のクエン酸を用いる鏡面研磨にも適用できることもわかってきた。

ガラスのピッチポリッシングやワックスポリッシングについても、少なくとも表面粗さをEEMやフロートポリッシングと同等に仕上げるには塵埃等を排除する条件が必要であることを明らかにし、BK7ガラス、レーザロッド用Ndガラス、蛍石などの高品質研磨を実現した。

さらに理化学研究所主導の科学技術庁科学技術振興調整費の大型研究の高精度・超平滑研磨の研究を分担した。X線ミラー用CVD-SiC膜の微細ダイヤモンド砥粒によるピッチポリッシングを行い、Zygo社などの光学式表面粗さ測定機の表面粗さ標準片と同レベルあるいはそれ以上の高品質鏡面に仕上げることを可能にした。また、研磨にロボットを導入することも試みた。計測装置と一体にした高精度形状研磨を実現するため、On-machine Measuring法に代わるOn Measuring Instrument Machining法を提案し、例えば三次元測定装置テーブル上でアームロボットによって操作できる回転研磨ヘッドを試作し、それによる平面や非球面の研磨を行った。

2002年4月から5年間は、東京電機大学の機械情報工学科の特別専任教授としてここでも研磨の研究を続けた。機械工作実験のなかの研磨実習で金属材料のSKD11の焼入れ材と焼鈍材、ねずみ鋳鉄、SUS304、A5056、64黄銅、無酸素銅、硬脆材料のSi単結晶、石英ガラスに対して、水性および油性の研磨液はじめ、様々な加工条件のもとラッピング特性を把握した。またSiCおよびSi₃N₄セラミックスのポリッシングで化学作用を重畳させてCr₂O₃砥粒でダイヤモンド砥粒に匹敵する加工量、表面粗さを得るまでにした。

Siウエハの研磨については、将来φ450と大口径になることを前提に企業との共同研究で新添加剤を用いる研磨剤の検討を行った。特に口径の大きい工作物とパッドの僅かな隙間に研磨剤が流入し易くすることを課題にしてきた。

両大学で上記のような研究を進めたほか、「ポリウレタンパッドとピッチポリシヤを用いたポリッ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」のテーマ名の高度技術者研修会を企画し、1997-2002の6年間に35社、35名の技術者に技術指導を行った。また産業技術総合研究所の加工技術のデータベースの研磨技術を担当し、ここでは研磨教育を中心に構成しており、現在、開示されている。

5) 河西研磨技術特別研究室を設立して

2007年5月に(株)河西研磨技術特別研究室を埼玉大学ベンチャーのひとつとして設立し、当大学内の地域オープンイノベーションセンター内に活動の場を置いている。土肥俊郎教授(現九州大学)ならびに池野順一教授には、設立時からその後も、多くの援助と協力を得ている。

おもな仕事としては、これまでに蓄積してきた研磨技術を、世の中の企業に移転し、また人材育成に寄与していくことを目指している。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きた。特に技術指導では、高度研磨技術研修(A)、(B)を計画し、(A)の「ピッチポリッシングによるオプティカルフラットの製作研修」をこの5年間に18社22名に、(B)の「研磨理論」を防衛大学の宇根篤暢教授の協力のもと15社20名に対し

て進めてきた。

このほか、小型修正輪形研磨機については、改善が進み、現在のところ第8世代までできている。また、各種材料の研磨特性把握のための多目的基礎実験用小型研磨機作製にも手を付けている。

さて、研磨に関しては、この50年間を通して結構好き勝手のことができた。ここで高度な研磨技能・技術を身に付けていくことに触れてみたい。一般には、技能・技術を身に付ける場合、雑念がなく、みずみずしい感性を持ち、また吸収意欲が旺盛な若年者が適すると言われてきた。若くして技能・技術の習得を始めた方がより高い奥義に到達できるという指摘もある。近年、このような高度の技能・技術を持っていた技能・技術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指向などがあり、重要と思われる技能・技術の退化が心配されている。このような状況下でも、我々は技能の技術化を進めていかなければならない。仮に年齢が高くなったとしても、研磨技能・技術を実技の実習を通し、初歩段階から順次身につけていく場合、若さを取り戻し、五感を研ぎ澄ませるようにしなければならないと思う。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、それらをもとに改善や工夫を巡らし技術化を進める。その際、単なる感ではなく、最新の高性能測定装置類による評価・分析技術を活用することも重要になってくる。

このほか研磨については、新たに考えていかね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。この分野では、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のなかに新たな検討課題がある。