

精密加工の研究をかえりみて

Remembrance of Researches on Precision Machining

今 中 治*

Osamu IMANAKA

24年半の工業技術院電子技術総合研究所, 7年半の金沢大学工学部, 2年間の東京大学生産技術研究所における筆者の研究生活の思い出をまとめたものであり, 退官記念講演の内容を書き改めたものである。加工の研究に興味をもつようになった経緯, 電気抵抗絶対測定用標準インダクタ・ガラスボビンの精密加工, 無機材料の精密加工に関する研究, セラミックスの超精密研磨技術の開発, 液体ジェット加工法の開発などについて述べている。

1. はじめに

東大の生産技術研究所にご厄介になったのは2年間であったが, この2年間は私にとってまことに幸せな人生の一時期であった。亀井勝一郎氏の言葉にもあるように, 人生には不思議な出会いがあるものである。いく度かの人生の岐路をふり返えるとき, 出会いというものが進路の決定に大きく影響していることは驚くほどである。それは求めて得られるものではなく, また, 求めずして得られるものでもないという。幸せをしみじみとかみしめて, あつく御礼申しあげる次第である。

私の「加工」との出会いは, 海軍技術学生(航空射撃兵器専攻)として勤労働員中の鈴鹿海軍工廠機銃部の仕上げ工場においてであった。昭和20年のことである。航空機塔載用13mm機銃の閉鎖部のすり合わせ工程を改善しようとしたのが始まりである。チャチではあったが, ラッピング機械らしきものを作り上げた。一種の自動寸装置も付いていた。もともと, それが動き出すころには, 戦さは終わったが…。

そのころの副産物として, 加工物材質によって除去量がかなり異なること, 特にガラスのラッピングでは鉄鋼のそれに比べて格段に大きな除去速度の得られることをじかに体でおぼえていた。いつしか, ガラスの透徹した美しさに惹かれ, そのこわれかたの不思議さに魅せられていた。そして卒業後の進路は, ガラスのラッピングに関係したところを目指すようになっていた。

昭和21年, 卒業とともに日本光学工業(株)に入れていただいたのも, こんなことからであった。それがまた, 昭和26年4月からの工業技術院電気試験所(現在の工業技術院電子技術総合研究所)における電気抵抗絶対測定

用標準インダクタ・ガラスボビンの精密加工につながる。24年6月にわたる電試(電総研)の研究を主体に, 昭和50年10月からの金沢大学工学部精密工学科のそれをも加えて, これまでの研究生生活のあれこれをふり返ってみたい。

2. 標準インダクタ用ガラスボビンの精密加工

電気抵抗の絶対測定とは, 周知のように, 電気抵抗(Ω)の次元が $[LT^{-1}\mu]$ であることから, 長さ $[L]$ と時間 $[T]$ と透磁率 $[\mu]$ を測定して, これら基本量から組み立て量の電気抵抗を求めようとするものである。具体的には, 正確な寸法の標準インダクタを製作し, その寸法測定からインダクタンスを計算し, これと電気抵抗の原器とをブリッジに組んで, 抵抗の絶対単位を定めようとする仕事である。

この研究のキーポイントは, 必要な幾何学的精度をもつ標準インダクタが得られるかどうかということであった。直径300mm, 長さ370mmのガラス・ボビンにピッチ1mmのねじを切って, その精度を $\pm 1\mu\text{m}$ に収めることが要求されていた。精密工業の専門会社に問い合わせても色よい返事が得られない。電気単位の維持に関する国際的な仕事であるから, 標準インダクタも所内で製作しようということになった。急がば回れ, 研究グループを編成して基礎研究から積み上げようということでも, 精密工学科出身の私が「電気」を冠した研究所に招かれたわけである。

3年前から電試におられた小林昭先輩(現在埼玉大学工学部教授)のご指導を得て, 加工の方針を決定した。すなわち, 機械加工法は加工物と工具の相対位置関係の設定によって, ④強制切り込み方式と⑤圧力切り込み方式に大別できるが, ⑥のねじ研削によって数 μm の精度

* 東京大学生産技術研究所 元教授

を確保し、⑥方式のねじラッピングによって目標精度を達成しようとした。④では工作機械の動的精度によって加工物の精度が決まるが(母性原則)、加工精度の再現性がよい。⑤は、作業に比較的長時間を要するという難点もあるが、工具の精度に留意すれば加工機械の精度以上の加工精度を実現できる。このような考えに基づいてボピンの仕上げ加工の方針を決めたわけである。

なお、このボピンは大阪工業技術試験所で研究製造された特殊ほうけい酸ガラス製で、同所で溶解鑄込みの後、電試木挽町分室で外面・内面・端面の研削加工を行って、再び大工試で精密アニールを施す。これに、上記の方針でねじを加工し、そのねじ溝を案内として直径0.7mmの無酸素銅線を巻いて標準インダクタ(図1)を完成する。

さて、精研削に使用する機械としては、種々奔走の末、Ex-Cell-O ねじ研削盤(図2)を入手し、これについて細密な精度向上作業を行った。アニール後の仕上げ加工

は、①ボピン外周の精研削、②ねじ研削、③ねじラッピング、④加工中の寸法測定に大別されるが、その全工程を、この機械を用いて(20±0.1)°Cの恒温室で行った。

ねじ研削中に経験したことであるが、A系砥粒を用いる場合、硬いAl₂O₃砥粒でそれより軟いガラスを研削するにもかかわらず、Al₂O₃の摩耗は思いのほか大きく、そして、その摩耗は研削雰囲気によってかなり変わることであった。この現象が後に、「軟質パウダによる硬質材料のメカノケミカル・ポリシング」という新しい超精密研磨法を生むヒントになったのであるが、当時としては、タイムスケジュールの定まったプロジェクト研究であるため、深入りすることは許されず、ダイヤモンド砥石の試用によって当面のトラブルを切り抜けたのを覚えている。ダイヤモンド砥石は国内では普及しておらず、苦心のすえアメリカから輸入したものをを用いたのである。

一つの問題を解決すると、別の次元の新しい問題が生起することも、身にしみて体験した。ダイヤモンド砥石によるガラスのねじ研削は、わが国では初めての経験であり、ダイヤモンド砥石の偏心・横振れの修正や砥石摩耗による形状変化の修正などに対して、有効な方法は確立されていなかった。ダイヤモンド砥石のトルーイング装置を試作し、ねじ研削盤テーブルの心押し台の右方(図2参照)に取り付けて使用した。

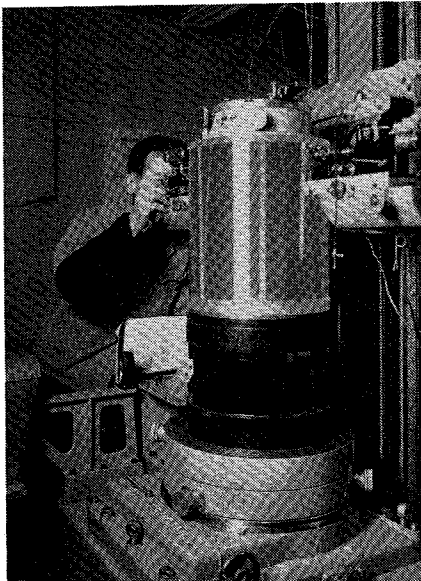


図1 寸法測定中の標準インダクタ

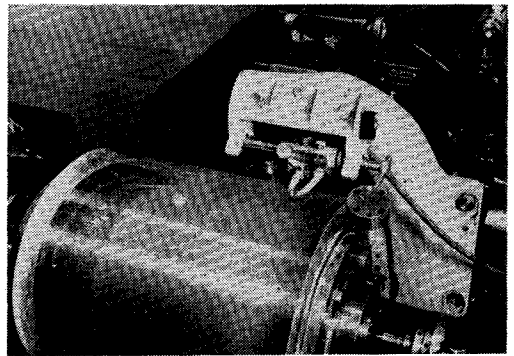


図3 ボピンねじ溝のピッチ測定

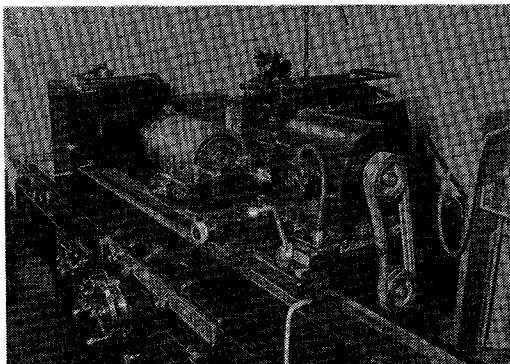


図2 ボピン精研削のEx-Cell-O ねじ研削盤

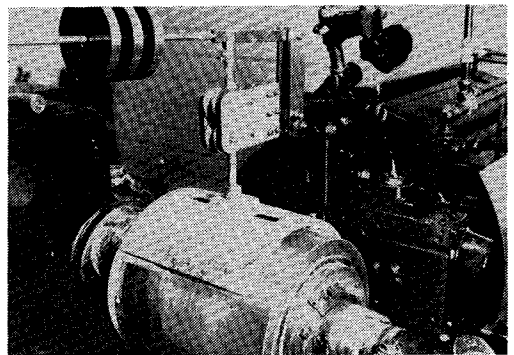


図4 ボピンのねじラッピング

ねじラッピング工程については、ねじ研削後の精度は有効径**・隣接ピッチとも土数 μm に達したので(表1参照)、ボビンねじ溝を母型としてねじラップを製作することを考えた。電鑄なども試みたが、最終的には光学研磨用ウッドピッチを押し付けて型取りする方法を採用した。ねじ研削後のねじ溝精度を、ボビンを機械に取り付けたままの状態で測定し(図3)、その結果をもとにラップの設計・製作を行う。ラップは、図4に示すように、研削盤砥石台に取り付けた支持具で支持する。ラップ圧力は重錘によってレバー・支持棒を介して与え、重錘の数およびレバー上の位置を変えてラップ圧力を加減す

る。局部的の修正には、上記ラップの一部を削りとった短ラップを用いた。

表1 ボビンの精度

ボビン 番号*	有効径の不齊 度 (μm)		隣接ピッチの 不齊度 (μm)		仕上げ加工に要した 期間
	研削後	ラッ ピング 後	研削後	ラッ ピング 後	
12	± 8	± 6	± 3.5	± 2	1954.3~1954.9
15	± 6	± 3	± 5	± 1	1955.1~1955.6
21	± 4	± 1	± 2	± 1	1955.8~1955.11
19	± 4	± 1	± 3	± 1	1956.1~1956.11
27	± 6	± 2	± 4	± 2	1957.4~1958.3
33	± 6	± 2	± 4	± 1	1959.1~1959.11

** 直径 0.700 mm の銅線をねじ溝に巻いた場合の銅線中心線の直径に相当する寸法で、普通の意味のねじ有効径とは異なる。

* 大阪工業技術試験所での溶解順序を示す。

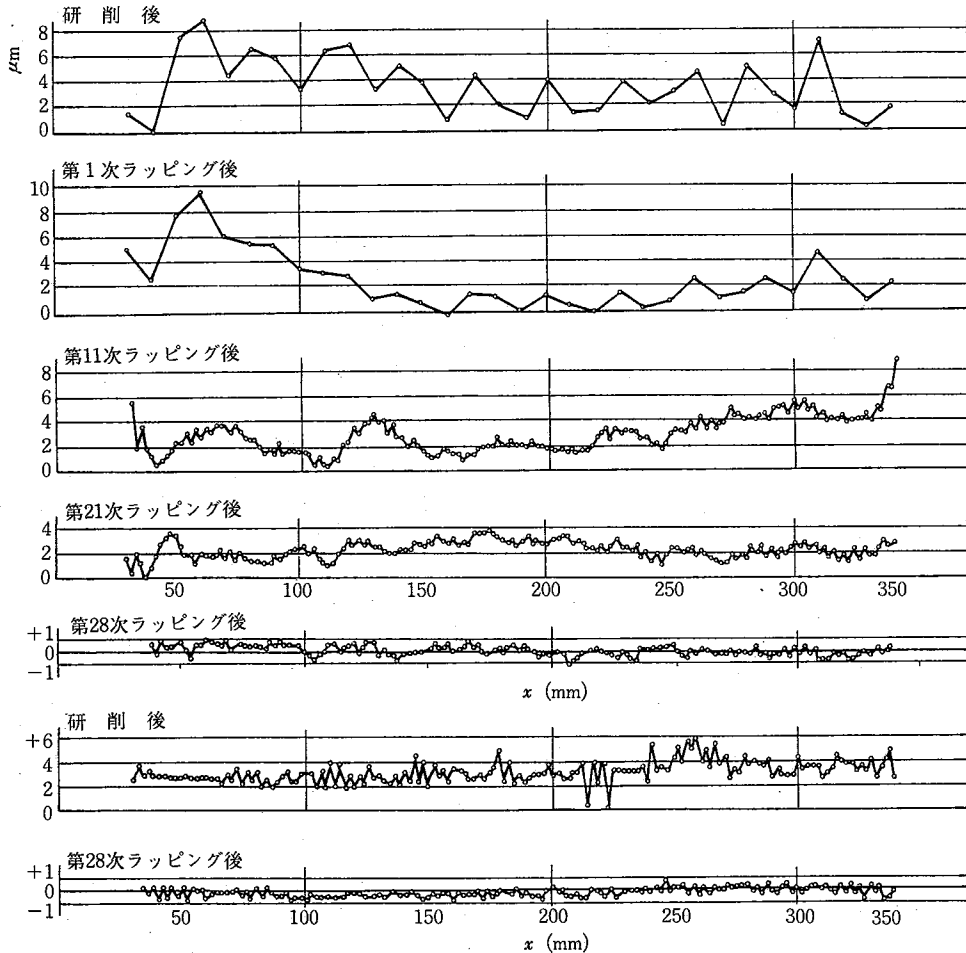
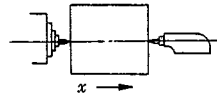


図5 ねじラッピングによる有効径(上5つ)と隣接ピッチ(下2つ)精度の向上(ボビン No.19)

なお、砥粒としては酸化セリウム(平均粒径 $1.3\mu\text{m}$)を用いウッドピッチを工具としたのであるから、砥粒のガラスに対する除去作用を主体に考えると、厳密にはポリシングと称すべきであるが、当時の慣用語のままにしておく。局部的な修正のためには、水にCMCを混ぜたものをラップ液として、場所によってその濃度、すなわち粘度を変える手法をも採った。電場・磁場などを援用して砥粒の作用状態を規制しようとする砥粒加工法を後年試みたのは、局部的修正ラッピングの必要性を痛感したことに由来するのである。

標準インダクタとして完成したポピンは6本であって、そのねじ溝精度は表1に掲げるとおりである。ラッピングによるねじ溝精度向上の一例は図5に示すように、測定とねじラッピングを繰り返して、数ヵ月20数次におよぶねじラッピングの結果、目標精度に達したものである。

各方面のご指導・ご協力もあって、8年余の悪戦苦闘のすえ、所期の目標値を満足するインダクタを完成することができた。その結果は国際的にも高く評価され、精機学会の第1回明石記念会記念賞を受けることができた。

異質の専門家の間にもまれた結果、ものごとを定方向からのみ見ないで、別の視座から眺めることを悟ったのも大きな収穫であった。電気抵抗絶対測定のために編成された研究班には、ポピン加工のほか、巻線、寸法測定、電気測定などのグループがあった。出身学科でいえば、精密、計測、応用化学、物理、電気などの研究者の混成部隊であった。狭い枠の中でのことを言っても十分なコミュニケーションは得られない。頭をやわらかくして、とらわれない考え方をせざるを得ないのである。そして、隣接する科学・技術での方法論を取り入れることをも学んだわけである。

3. 無機材料の精密加工に関する研究

上記の仕事が一段落したとき、研究にある程度の自由度が許されることになった。さて考えてみると、電気関係の研究所に籍をおいたからには、おのずから枠の存在することは当然である。加工に魅せられた身には、好みの方向はほぼ決まっている。出身学科にこだわるわけではないが、電試では精密工学の研究者は少数民族であることも事実である。錦の御旗をおし立てて、天下の大道を主流として行動することは、所詮かなわぬことであろう。それならば、誰もやらないこと、ここでしかできないことを、と思い定めるのに時間はかからなかった。

研究テーマを「電気用無機材料の精密加工」としたのは、このようなことからであった。対象とする材料は、ガラスのほか焼結セラミックス、単結晶材料と広がった。といっても、限られたマンパワーと時間のもとに、

多岐にわたる材料のそれぞれについて、しかも数多い加工法のあれこれについて、加工要因と加工特性の関連を逐一追究することは必ずしも得策ではない。

むしろ、典型的な材料と加工法とを取りあげて、しかもその加工機構を重点的に解明すべきである。そうすれば、現用加工条件の改善にも資するところがあろうし、材料物性を活かした新しい加工法を生むことができるかもしれない。また、極端条件下における材料挙動を検討することが、常用の条件を見直す糸口となるに相違ない。こんな考え方で研究を進めたのである。

3.1 ガラスのラッピング機構

この研究はインダクタ・ポピンの加工と併行して行ったものである。ガラスの粗ラッピングにおいて、ほとんどすべての加工面はいわゆる貝殻状破面の集成からなり、金属のそれとは全く異なった様相が見られる。ガラスの粗ラッピングは砥粒切削による単純な切削作用ではなく、加工は材料の微小破砕の集積として進行すると考えられた。そこでガラスのラッピング現象の数式化を試みた。つまり、ラップ量・仕上げ面粗さなどの諸特性値が、加工に用いる材料(ラップ・砥粒など)やガラスの諸性質とかラッピング条件によってどう変わるかを、理論式化できれば、ラッピング現象の定性的説明は容易にできようし、また適正ラッピング条件選定の基礎ともなるであろう、と考えたわけである。

ラッピングを詳細に考えれば、結局は単粒による微小部分のラッピング作用の集成である。まず単粒に着目して、ガラス平面に対して「単粒によるころがり」「単粒による引きかき」「単粒による押し付け」の諸実験を行った。その結果、単粒のころがりもしくは引きかきによってガラス面に貝殻状破面の生じる場合、単粒にかかる荷重と破面の拡がりとの関係は、単粒の押し付けによって生じたそれとほとんど同一の傾向を示すことがわかった。また、形状のわかっている模型単粒との比較実験の結果、単粒先端には平均的に見て、ある程度の丸みがある、との結論を得た。すなわち、単粒によるころがりもしくは引きかき現象、換言すれば単粒によるラッピング現象は、先端に丸みをもつ圧子による押し付け現象で解釈できることになる。

次に、球面圧子によるガラス平面の押し付け実験で、円錐割れ成長の機構を考察し、割れによる新生表面積は割れ発生前の弾性ひずみエネルギーと一定の関係をもつことを見出し、割れの拡がりについての理論式を求めた。また作用砥粒数およびガラス面に割れを生じさせる有効作用砥粒数についても、砥粒の大きさの分布を考えに入れて解析した。これらを総合して、ラップ量・仕上げ面粗さの理論式を導出し、理論値は実測値をかなりよく説明できることを確認した。

3.2 セラミックス類の研削特性

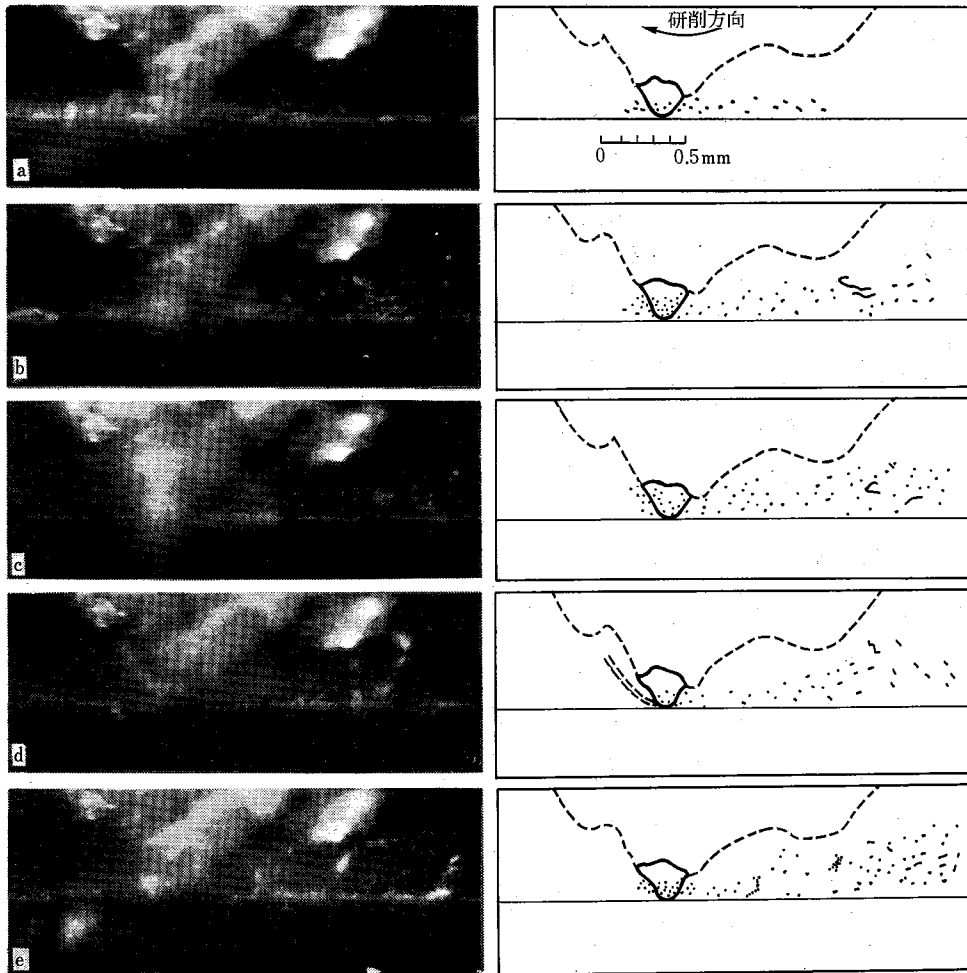


図6 ガラス研削におけるチップの排出状況 ガラス：
F2, 砥粒：GC #46, 研削速度：12.5 m/s テーブル
速度：2.5 m/min, 切り込み：5 μ m

図6は、高出力のマイクロ・フラッシュ（せん光持続時間0.8 μ s, 出力10J）を用いて、研削チップ生成の瞬間を撮影した結果である。横軸-テーブル往復動型の平面研削盤を用いて一種の単粒研削を行い、あらかじめ設定した位置でフラッシュを発生させ、チップ生成の状況を拡大撮影したものである。図のaは切り込み直後、cは切り込み最大、eは切り込み終了直前の位置におけるチップを示す。鋼のような延性材料の研削では連続形の切りくずが見られるのに対し、ガラスの粗研削では、微細に破碎された形の粉末チップが観察される。この粉末チップは砥粒進行方向へ出ると同時に、砥粒通過後のガラス面からも飛び出している。

この現象は、研削時の砥粒との接触応力によってガラス面に生じた割れが、砥粒通過後、応力からの急激な解放によってその肩部が押し上げられ、碎片として離脱す

るものと解釈される。興味あることには、砥粒切り込み深さの小さくなったd段階で、一種の連続形チップが砥粒すくい面に沿って生じている。材料に先在するクラック欠陥の分布間隔と加工単位のかかわりで説明できるものである。同様の現象は焼結セラミックスならびに無機単結晶材料でも確認している。セラミックス類の砥粒加工において、加工単位なる概念の重要性を再認識した次第である。

ところで、極端条件下における材料挙動の例が、真空を含む各種環境条件下でのAl₂O₃の破壊強さに関する実験であった。研究室では高真空中での研削実験も行った。空気のみを乏しい雰囲気下で生ずる現象から、空気成分ならびに空気中の水蒸気の研削現象に及ぼす作用を明らかにすることができた。現実からひとたび遊離することによって、現実をよりよく認識することができ

たわけである。また、これらの実験から研削界面、つまり砥粒と加工物との接触界面における化学現象の重要性を悟った。インダクタ用ガラスポピンの研削において生じた疑問点を解決する入口に近づいた感じを持ったのも、この時である。

この「研削加工における雰囲気の効果」に関しては、故人となられた上口敏昭氏についてふれておかねばなるまい。氏は昭和28年大阪大学精密工学科を卒業後、電試に入所され、ポピン加工の基礎研究に従事され、その後、雰囲気効果の研究途中に、乞われるままに神戸大学計測工学科に助教として赴任された(昭和40年10月)。引き続きの研究が氏の学位論文となったのである。そして惜しくも、金沢大学教授として赴任の数日前、昭和46年11月26日に病のためこの世を去られた。私が電総研から金沢大学に出向することになったのも、氏の逝去に胚胎する。

3.3 電場・磁場援用の砥粒加工の試み

私が金沢大学に移ってから、前項の引き続きとして、加工単位と砥粒保持剛性との関連を検討するため、ポリシャ表層の動的粘弾性挙動とか粘弾性体支持砥粒の加工機構なども扱った。

そして、何か新しいことをと模索しているうちに、電場・磁場など、場(field)の働きを援用して砥粒の運動を規制しようとする新しい砥粒加工法に辿りついたのである。Field-assisted Fine Finishing (FFF と略称)と名づけた。磁性流体利用のFFF、電気泳動現象利用のFFF、プラズマ利用のFFFなどを試みた。共同研究者の黒部利次助教(現在、同学生産精密工学科教授)が物理出身であったので、異なった面からの討論が楽しめた。

4. セラミックスの超精密研磨技術の開発

硬い Al_2O_3 砥粒でそれより軟いガラスを研削するにもかかわらず、 Al_2O_3 が思いのほか摩耗することは前に述べたが、さらに軟い軟鋼を研削しても摩耗は生じる。しかも、その摩耗は研削雰囲気によってかなり変わる。研削砥石面を X 線的に観察すると、さまざまな反応生成物が同定された。そこで、どのような反応が摩耗にどのように影響するかを明らかにするため、条件をより単純化して、 Al_2O_3 単結晶(人造サファイア)の摩耗に関する一連の実験をした。念頭の宿題にとりかかったわけである。前項よりは時代はさかのぼって、電総研在任の時のことである。

例えば相手材料が軟鋼の場合、摩耗粉の X 線解析結果とサファイアの摩耗量とを比較すると、生成酸化鉄がほとんど $\alpha-Fe_2O_3$ のみである。軽摩擦条件では摩耗が大きく、 FeO の生成に伴って摩耗の減少する傾向が見られた。摩擦面にブラシを押しつけて摩耗粉を除去しながら実験した場合には、サファイアはほとんど摩耗しなかつた。

生成酸化鉄の種類がサファイアの摩耗に大きな影響を与えることがわかった。

生成酸化鉄の硬さはサファイアのそれに比べて格段に低いわけであるから、力学的な考察だけでは、この現象は説明できない。模索を繰り返しつつ種々の仮説を消してゆくうちに、接触界面でのメカノケミカルな挙動に行きついたのである。すなわち、軟鋼に対するサファイアの摩耗は基本的には、サファイアよりはるかに軟質の酸化鉄パウダとの摩擦接触点における固相反応に基づいて進行することが推論されたわけである。この微小反応部分が摩耗力によって除去されて、極微小単位の摩耗が生じると考えたのである。

これを検証するための実験を行っているうちに、この摩耗機構を活かした新しい加工法の発想が生まれた。ものが摩耗するという現象は本来、望ましくないことである。摩耗機構を明らかにすることは、摩耗を小さくすることを暗黙のうちに目的としている。しかし、加工技術者としては、ものが耗するという現象はむしろ積極的に活用すべきものとも考えられた。

加工物との反応性に富むパウダを用いると、パウダが軟くても、硬いものを磨くことができる。加工物より軟いパウダで磨けるということは、つぎのような利点を生じる。つまり、パウダが加工物に対して押し込み・引っかき作用を営む可能性がないため、スクラッチのない鏡面が得られる。また硬質砥粒による従来の研磨法に比べて、剛性の高い工具(ポリシャ)が使えるので、縁ダレのない高精度の面が得られる。そして加工変質層はほとんどない。

加工エネルギーの与え方はマクロには力学的であるが、加えられる力学的エネルギーの一部が固体表層にとり入れられて、メカノケミカルな状態で接触点局所の活性化をもたらし、これが加工機構の主要因となる。新しい超精密研磨法「軟質パウダによるメカノケミカル・ポリシング」誕生のいきさつである。サファイアのほかに水晶、Si などに適用可能なことをも確認した。

また、研削界面の化学現象の検討から生まれた新加工法としては、過熱水蒸気中の水和物生成を利用した「ハイドレーション・ポリシング」もある。研究の面白さというものは、初めに予想したとは別のコースをとって、思いがけない実りの得られるところにある。

5. 液体ジェット加工法の開発

これも電総研時代のことであるが、研究の展開をあれこれ模索して加工法を整理し直しているうちに、「超高速の液体で固体材料が加工できないか」という考えがふと浮んだ。固体工具による加工は古くからある。電子ビーム、イオンビームとかプラズマによる加工もその特異性が注目されつつある。高速の液体がもつ力学的エネル

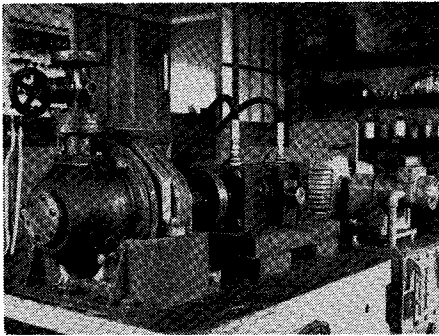


図7 液体ジェット加工実験装置1号機

ギは材料の加工に使えないだろうか、なぜ加工エネルギーの媒体として液体が使われていないのか、とノートに整理したマトリックスを見ながら考えていた。

たまたま、航空機の速度が上昇するにつれて雨滴による機体の損傷が問題になってきた、という記事を目にした。この雨食 (rain erosion) という現象は、航空機にとってはマイナスになる。しかし加工屋の立場に立てば材料が破壊もしくは変形するということは、プラスに転換できることでもある。材料に一定のエネルギーを与えて、われわれの希望する情報 (形状、寸法、表面粗さなど) を材料に記憶固定させたプロセスが加工なのである。材料の変形破壊をコントロールできれば、加工として利用できるはずである。

こんなことから加工装置の構想を練って、あれこれの失敗のすえ、1号機 (図7) の試作を終えたのは昭和37年の暮れもおし迫った頃であった。増圧機によって1000気圧に加圧した水をノズルから噴出させる形式のものである。よほど嬉しかったらしく、非常勤講師を努めていた本郷の精密工学科の講義で早速に吹聴したようである。当時の教え子のY君が最近「先生が目を輝かせて話されるのを聞き、研究とはそんなに楽しいものかと感じ入り、この道を志しました」と打ち明けてくれた。

さらに検討を加えて昭和43年夏に完成した3号機 (図8) では、吐出圧力は1万気圧に達し、口径0.1mmのノズルから噴射するジェットの速度は1300 m/sという結果を得た。ジェットのパワー密度 (単位面積・単位時間あたりのエネルギー) は 1.2×10^8 W/cm² に及ぶものである。

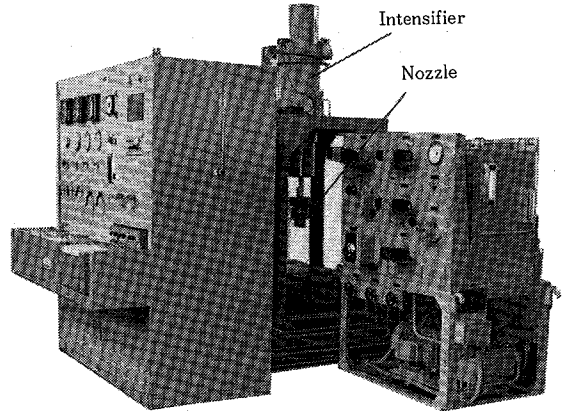


図8 液体ジェット加工実験装置3号機

発泡材とかハニカム材などデリケートな構造の材料とか、爆発・発火のおそれのあるものの切断に対して効果があり、とくに曲線切りに威力を発揮している。砥粒添加のアプレシブ・ジェットは新素材の切断や土木建設関連作業で伸びつつある。昭和58年11月には「ウォータージェット技術研究会」が設立されるまでに到った。

6. おわりに

セラミックスといい、超精密加工といい、エネルギービーム加工といい、ふとした出会いから踏み入れた径は、予想外の展開を見せそうである。命果つる日まで、さすらいの旅を続けたく念じている。

あてどなき漂泊を続ける身には、電話の父 Alexander G. Bell の言葉がこよなき道しるべのように思えてならない。いわく、“いつまでも本街道ばかり歩いていないことです。まれには普通の道から離れて森の中に入ってみなさい。そこで、きっと今まで見たこともないものを発見できるでしょう。それが大したものでもなくても馬鹿にしてはいけません。いつまでも追いかけて調べ上げなさい。何か一つ発見すれば、それがまた、つぎの発見につながるのです”。

短い期間ではありましたが、古くからの同僚のように暖いご支援を賜りました生研の皆様に、心から御礼申し上げます。ありがとうございました。

(1985年9月17日受理)