

Elastic Emission Machining

井 川 直 哉*
森 勇 蔵**

科学技術の発展は、常に加工技術の進歩に支えられたものであり、加工技術の重要性は増加する一途であるといえよう。たとえば、古くは産業革命、最近では宇宙開発、種々の電子素子の出現などにその例を見ることができる。加工技術に対する要求は、当然、時代とともに変化するものであり、今日、それは単に加工精度だけではなく、加工面の結晶学的性質、さらにはその加工法の自動化にまで広がっている。すなわち、加工精度としては、加工単位の極限である原子オーダーの精度が求められつつある。また、電子素子（IC、LSIなど）の加工に見られるように、加工面の結晶学的性質としては、加工によって工作物材料の性質を損なわない、つまり加工表面層が結晶学的完全性を有していることが望まれるようになってきている。加工技術は、高精度加工を目差す場合には、これまでは名人芸的な個人の技能に頼る面が大きかったが、自動加工が可能となれば、その加工法の経済性、汎用性は飛躍的に増大することになる。

従来の加工技術を以上のような観点から考えた場合、たとえば切削、研削加工のようなこれまでの機械的加工法では、加工精度を原子オーダーに近づけようとすれば機械自身の精度をそこまで高めなければならず、常に塑性変形による表面層の加工変質を伴う。一方、加工変質を伴わない電気・化学的加工法（電解研磨、化学研磨など）では、工作物材料の不均一性などのために加工精度はあまりよくなく、結局いままでの加工技術では時代の要求を満足させることはできないと思われる。

さて、よく知られているように材料内部には転位やクラックなどの欠陥が先在しており、このような欠陥の分布密度は制約があって、加工変質を受けていない状態では転位で 10^8 個/cm²、クラックで 10^6 個/cm²以内である。それゆえ、欠陥の分布の間隔はそれぞれ $0.1\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ 以上および $10\mu\text{m}$ 以上であり、欠陥と欠陥のあいだは完全結晶状態であると考えられる。従来の機械的加工法では、加工時に発生する応力場が先在する欠陥の間隔よりも大きいため、加工における材料の破壊機構は塑性変型を伴うことになる。しかし、先在する欠陥のあいだの完全結晶部分で選択的に破壊が進行し、そのときに先在する欠陥が活性化されないならば、転位やクラックに依存しない原子間の弾性的な破壊に基づく加工が可能になると考えられる。筆者らは、このような加工をElastic Emission Machining (EEM)と名付け、これまで研究を行ってきたが、この加工法は加工精度、加工面の結晶学的性質および自動化の要求を満足することが明らかとなったので、以下にその成果の一部を紹介する。

弾性破壊を生じさせるには、先在する欠陥を活性化しないで工作物表面に一定のエネルギーを与えなければならない。そのための方法として、微細粉末粒子（ $0.6\mu\text{m}$ 以下）を工作物表面にほぼ水平に衝突させて表面の微小領域にエネルギーを与えている。当然、粉末粒子の衝突個数が加工量を左右する重要な因子であるから、粉末粒子を安定に加速、衝突させることが望ましい。そのため、図1に示すように、微細粉末粒子が水に一樣に分散、懸濁した混合流中で加工ヘッドに取り付けたポリウレタン回転球を工作物表面に近づけ、そのとき回転球と工作物のあいだで生じる混合流の流体軸受的流れを用い

* 井川直哉 (Naoya IKAWA), 大阪大学工学部, 精密工学科, 教授, 工学博士, 特殊加工学

** 森 勇蔵 (Yuzo MORI), 大阪大学工学部, 精密工学科, 助教授, 工学博士, 特殊加工学

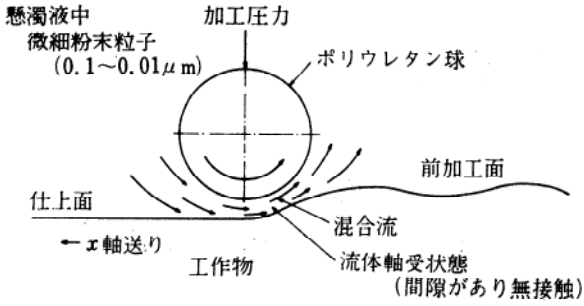


図1 粉末加速法

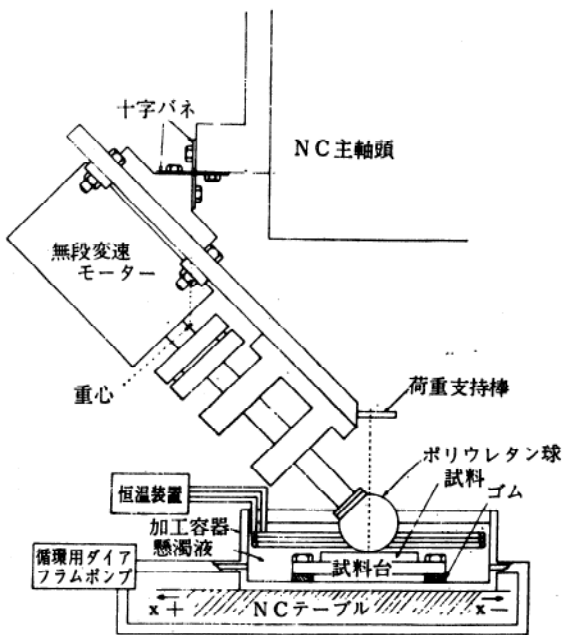


図2 加工装置概略図

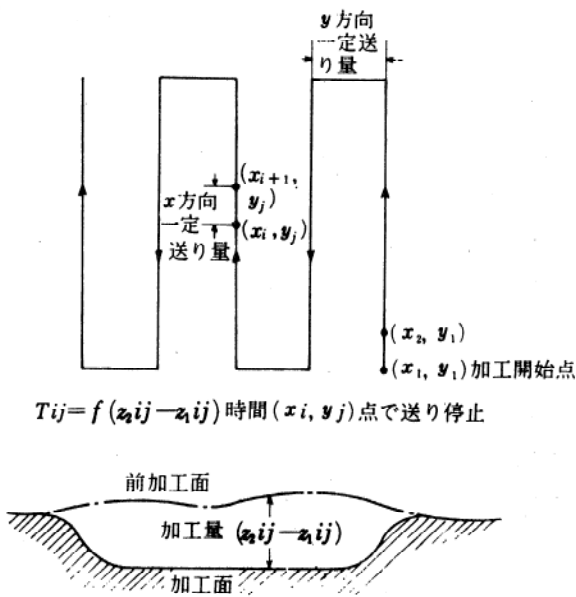


図3 加工装置走査法

て、混合流中の粉末粒子を工作物表面の微小領域に衝突させ、加工を行う。実際の加工装置は、工作物表面の凹凸に倣う必要があるので、図2に示すように十字バネを介してNC工作機械に取り付けられている。このとき、一度に加工される面積は微小であるが、その加工領域を図3に示すように順次工作物全面に走査しながら、各場所で必要な加工量（前加工面と所定加工面の形状偏差）だけ加工すれば、容易に望ましい形状の加工面が得られることになる。いま、図3において、 x 方向に加工装置を一定量送ったのち、その位置である時間だけ送りを停止して加工を行い、また x 方向に一定量送りを与えるとのプロセスを繰り返して行った加工量と送り停止時間の関係を図4に示す。これより、送り停止時間を数値制御することにより、 $\pm 0.01 \mu\text{m}$ 以上の精度で加工量を制御しうることが明らかである。

図5は、数値制御加工の流れを示したものである。まず、前加工面の寸法および形状を精密測定し、工作物の (x, y) 座標における z_1 座標をコンピュータに入力する。さらに所用の寸法、形状を (x, y, z_2) 座標として入力し、両者の偏差 $(z_2 - z_1)$ を各 (x, y) 座標での

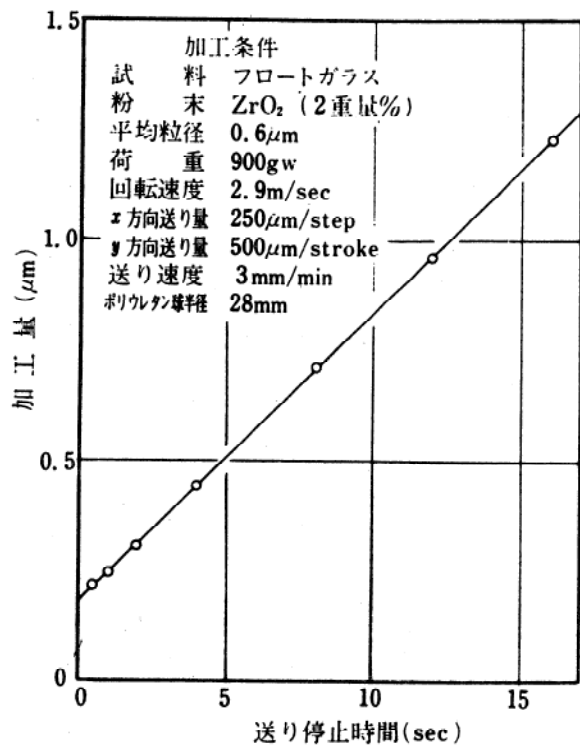


図4 送り停止時間による加工量の変化

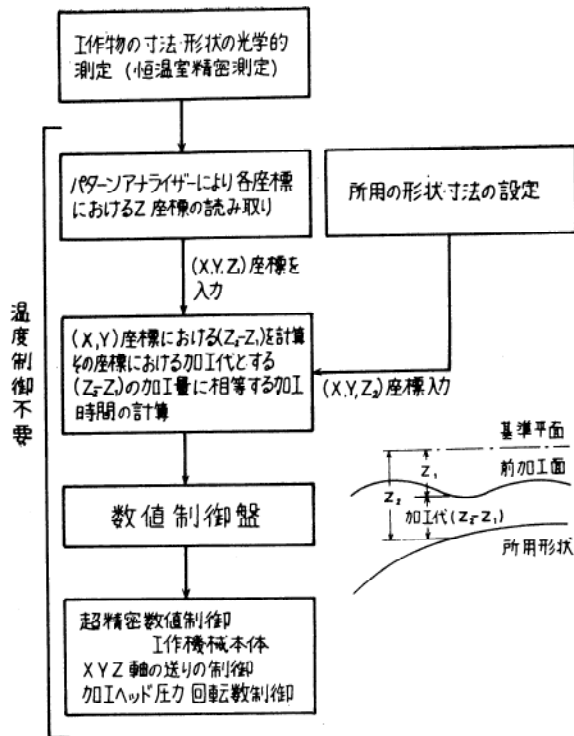


図5 超精密数値制御加工ブロック図

取り代とする。そして、この量にみあった送り停止時間により加工装置の送りをオンライン制御して超精密加工面を得る。この加工法は、旋削や研削などの従来の機械的加工法と異なり、加工量と送り停止時間（加工時間）との安定した関係を用いているため容易に高精度加工が可能となったものであり、またこのような加工につきものの熱の影響（熱膨張）を考慮する必要

のないことが大きな利点である。図6は、図5の考え方により実際に数値制御加工を行った例である。試料としてはフロート板ガラスを用い、A部をB部の高さに平面加工している。このほか、球面加工その他の任意曲面も同様の方法で加工可能である。

次に、EEM加工面の幾何学的および結晶学的性質について触れてみたい。図7はシリコン

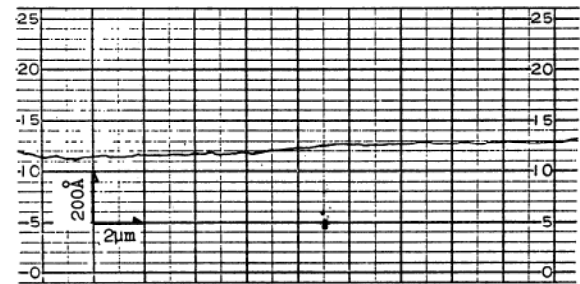
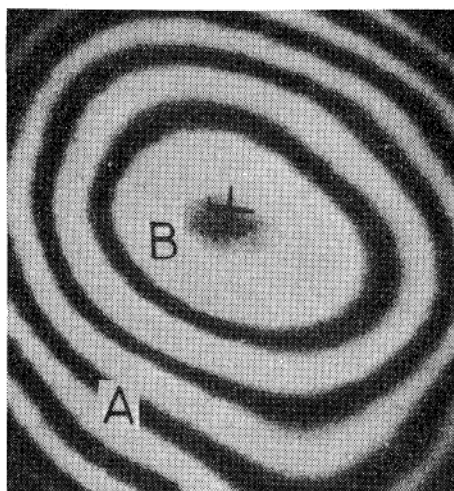
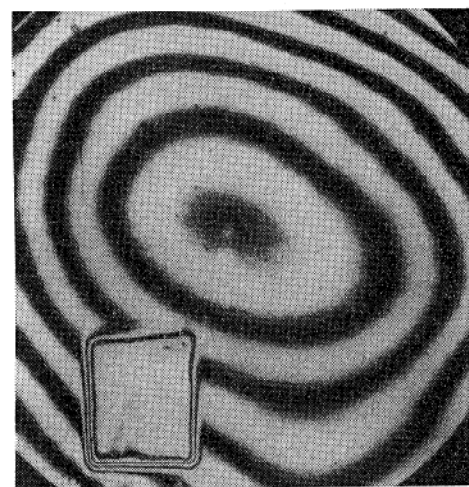


図7 Si単結晶加工面の表面アラサ (ZrO₂ 0.6μm)

単結晶を粉末 ZrO₂ 0.6 μm を用いて EEM 加工した面を微小段差測定機（タリステップ；最高倍率 100 万倍）により観察したものである。表面粗さが約 20 Å 以下であることから原子オーダーの加工が実現されているものと考えられる。また、加工面の結晶学的性質を電子回析法、薄膜透過電顕観察などの方法で調べた結果、その分解能の範囲内で物性的完全鏡面であることが示されている。さらに、従来の観察法よりも、より低密度で極表面に分布している微



(a) 前加工面



(b) 加工面

図6 平面加工干渉縞写真

A部がB部と同じ高さに平面加工されている
(試料：フロートガラス、60×60mm、1フリンジ 0.27μm)

生産と技術

小欠陥の検出が可能な光の反射率スペクトルの測定およびフォト・ルミネッセンス・スペクトル測定によれば、EEM 加工面は化学研磨面よりも優れた結晶学的性質をもつことが明らかとなっている。

以上、EEM の概念、方法およびその特徴を簡単に述べたが、この加工法によれば非球面レンズ、超 LSI などの加工も可能であると考えられ、応用範囲は非常に広いと思われる。