



研究ノート

Elastic Emission Machining による超精密加工

森 勇 蔵*

近年、超 LSI、精密電子素子をはじめとする新しい分野において、先端技術の開発、改良には目覚ましいものがある。その先端技術の進歩に伴い、加工の高精度化、超精密加工法の確立の要求が大きくなっている。

いま、加工というものを考えてみると、結晶材料にエネルギーを加えて目的とする形状、表面特性を持つ品物を得ようとするものであり、その理想は任意の形状に、材料本来の性質を損なうことなく仕上ることである。それは、材料構成の最小単位である原子単位での加工法の開発により実現される。すなわち、原子単位の加工により、極限の加工精度を実現することができ、さらに、加工領域に物理的、化学的損傷を与えなければ、物性的にも完全な表面に仕上げることができる。ところが加工単位は、本質的にその加工に利用されている物理現象に依存するもので、単に加工装置の高精度化のみでは加工単位を小さくすることはできない。例えば、切削、研削等の機械加工においては加工現象として、塑性変形を利用しており、加工域での転位の運動を必ず伴っており、加工装置の精度を高め加工単位の微小化を図ったとしても、その極限を転位の分布間隔より小さくすることは不可能である。理想の加工を実現するためには、物理的な思考のもとにそれに見合った新しい加工現象の発見、または、すでに現象が発見されている場合にはその制御技術の開発が必要となる。

このような加工の理想を具体化したものに、著者らが開発した Elastic Emission Machining (EEM) がある¹⁾²⁾。

EEM とは、二つの固体を接触させたとき、その接触面において原子間相互作用力による結合が生じ、二固体を再び分離するとき、一方の

固体表面原子がもう一方の固体表面原子を除去する場合があります、この現象を加工に応用したものを称している。具体的には、サブミクロン以下の微細粉末粒子を加工物表面に無荷重状態で供給し、それを運動させることにより、上述の現象を利用し、加工物表面の原子を除去してゆくものである。そのときの加工領域は、粉末粒子と加工物表面とが接触し、原子間結合が生じた微小部分に限られ、しかも、その原子間結合により、加工表面の第1層原子と第2層原子との間の結合力が減少するような特性を持つ粉末粒子を用いた場合のみ加工が進行する。粉末粒子と加工物表面との接触部界面では異種原子間結合が生じており、その界面層は電氣的に分極した状態であり、さらに、電子受容準位の有無によって局所的な帯電現象が発生している可能性がある。この場合、加工物表面原子はバルク内とは異なった特異な状態にあることになり、そのバルク側との結合力の減少が促進されるような場が形成されうる。図1は、その様子を示したもので、EEM が効率よく実現する例として、形成された界面が大きく分極し、その

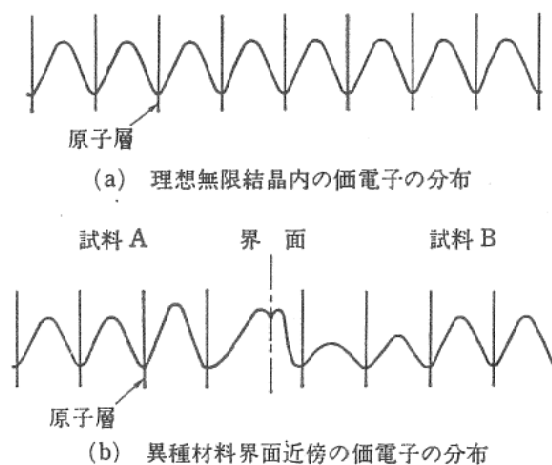


図1 EEM が効率よく進行する場合の界面での相互作用モデル³⁾

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

局所電場により加工物表面原子のバルク側との結合力が低下し、加工物表面からの原子の自発的離脱が促進される場合を示している³⁾⁴⁾。これらの現象の理論的解析は量子力学的手段を用いれば可能であり、図2はSi表面をZrO₂粉末粒子を用いて加工する場合を想定し、界面モデルとしてSi, Zr間のOを介する金属間結合を仮定してハートリーフォック近似によるクラスタ計算を行い、結合手上的電子分布を求めたものでもある。計算は外殻電子のみを考慮し、LCAO法により行っている。また同様の計算

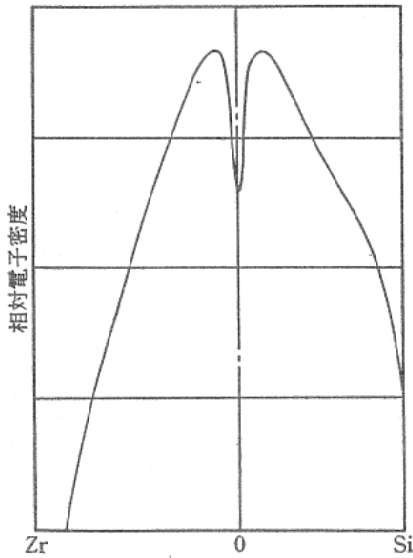
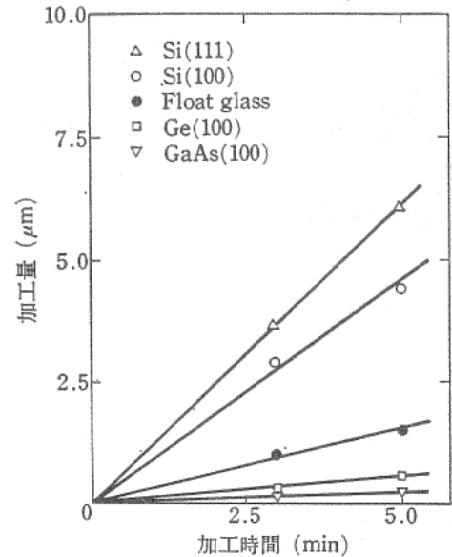


図2 クラスタとしてZr, Si間のOを介する直線状結合を仮定した場合の結合手上的電子分布 ($\psi^*\psi$ の分布)³⁾

をGe表面を加工する場合についても行って見たところ、界面での電子が作り出す局所電場による表面第2層原子との結合の低下は、Siの方が大きく現れており、図3の実験結果とも定性的に一致する。

EEMにより各種材料を加工する場合、加工機構より、その加工特性は粉末粒子と加工物材料との相性に大きく依存する。そのため加工物を能率よく加工するためには、粉末粒子の選択、その物性制御が非常に重要である。これは電解研磨、化学研磨の場合、研磨液の選択が重要であるのと同じである。図3の各種材料をZrO₂粉末粒子で加工したときの加工特性を示したものであるが、その材料依存性が大きいことが明らかである。また、粉末粒子の物性（結



実験条件

加工液濃度：3.2wt%，加工液温度：20°C
ポリウレタン回転球半径：28mm，回転周速度：3.0m/sec

図3 粉末粒子にZrO₂を用いた時の加工物の違いによる加工速度の変化³⁾

晶性、不純物等)の制御によってもその粉末粒子の加工能力は大きく異なり、粉末粒子の物性制御による加工能力の向上も重要な研究課題となっている。

上述した原理を応用し、任意形状の加工を可能にした超精密加工法として、著者らが開発したNC EEMがある⁵⁾⁶⁾。同原理を平面加工に応用したものととしてフロートポリッシング⁷⁾と称しているようなものがある。

NC EEMにおいては、粉末粒子を工作物表面にほぼ水平に、しかも安定に供給、作用させるために、懸濁液中でポリウレタン球を回転させ、それを工作物表面に近づけたとき、その境界層に生じる弾性流体潤滑状態を利用している(図4)。このときの混合流の流れの状態、混合流中の粉末粒子の運動は安定しており、単位時間当たりの作用粉末粒子数、加工速度も安定なものとなる。したがって各点での加工量はその点での加工時間によって制御できる。前加工面形状と所要形状との差より決る各点での必要加工量の除去を、その点での加工時間(ポリウレタン回転球の走査速度)の制御により行いながら、ポリウレタン回転球を加工領域全体に走査することにより、目的とする形状の加工を行

う。図5は、フロートガラスのA部をB部の高さに平面加工した例を示す。図より $\pm 0.1\mu\text{m}$ 以上の精度で加工されていることがわかる。図6に示すように、加工面の表面粗さはタリステップの分解能(5Å)程度まで得られ、2段レプリカによる電顕観察でも何も観察されず、幾何学的完全鏡面であるといえる。また、表面物

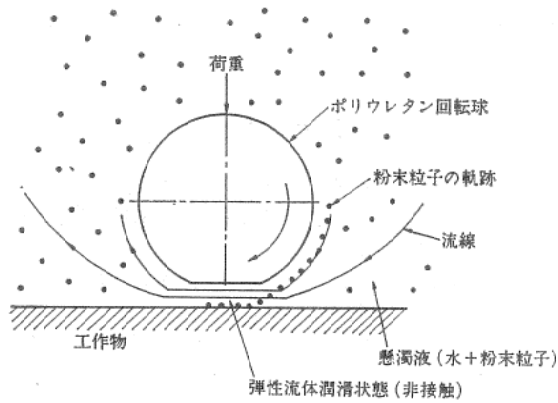
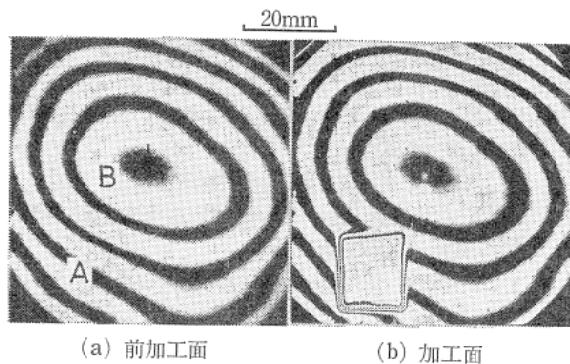


図4 NC EEM 加工における粉末供給法⁶⁾

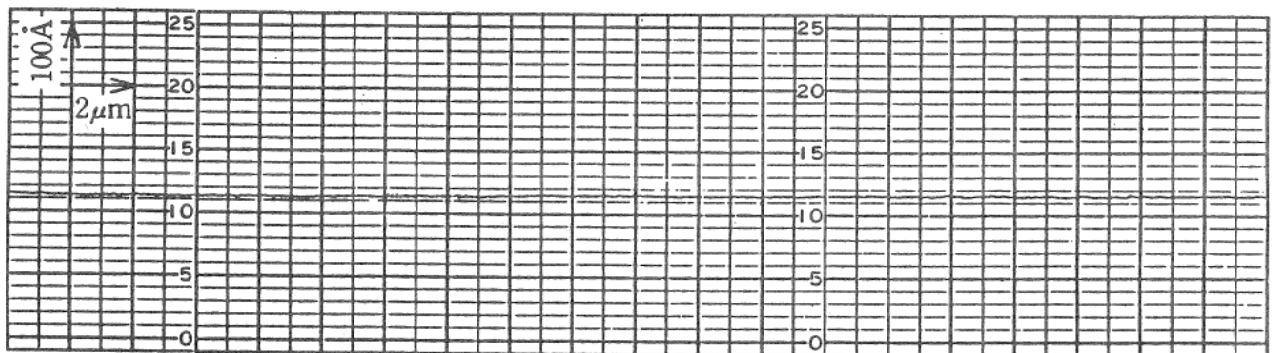


工作物：フロートガラス，60×60mm，1フリンジ：0.27 μm

図5 平面加工干渉じま写真(A部分がB部と同じ高さに平面加工されている)⁶⁾

性的鏡面であるかどうかという点に関しては、EEM 加工面は電子回析，X線トポグラフ(ラング法)，エピタキシャル成長層の積層欠陥の観察などの測定感度では完全な単結晶という結果しか得られず，MOS バラクタの C-V 特性より求めた表面準位密度においても化学研磨面と変わらないという結果を得ている。

そのほかの高感度な評価法としては，フォトルミネッセンス強度の測定による表面欠陥密度の推定がある。結晶内に不純物が混入すると禁止帯中にアクセプタ準位，ドナー準位が生じる。そのため，光により伝導帯に励起された電子が再び基底状態にもどるとき，これらのアクセプタ準位，ドナー準位にトラップされるようになり，これらの準位が関与した種々のエネルギーギャップに相当した光を発揮する。これがフォトルミネッセンスである。GaAs のフォトルミネッセンススペクトルには，8540Å，8310Å，8190Å の3種のピークが観察される。これらは，結晶中に存在する不純物 Si により生じたアクセプタ準位，ドナー準位に関係した発揮によるピークである。これらのピークの強度は格子欠陥の分布密度により変化し，ピークの強度値より欠陥密度を推定することができる。各種加工面についてフォトルミネッセンススペクトルを測定した結果を図7に示す⁸⁾。0.1 μm ZrO₂ を用いたラッピング面は化学研磨面の1/100以下のルミネッセンス強度に低下し，Ar イオンスパッタ面も1/10に低下しており，極表面層の結晶構造が乱れ，多量の空孔が発生していることを意味している。しかし，NC EEM 加



工作物：Si (111) 面，粉末粒子：ZrO₂ (0.1 μm)

図6 NC EEM 加工面の表面粗さ曲線

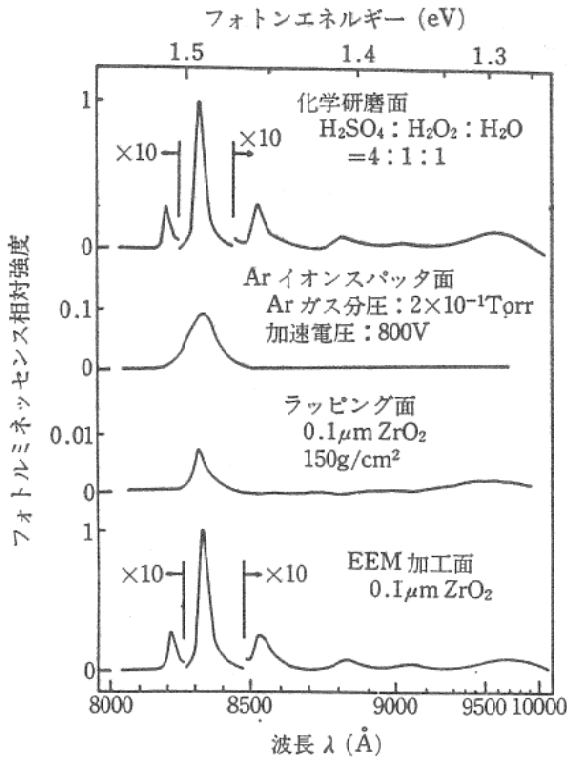


図7 GaAs の各種加工面のフォトルミネッセンススペクトル測定結果¹⁵⁾

工面のフォトルミネッセンス強度の低下は見られず、表面物性的鏡面であるといえる。

理想的な加工というのは、材料本来の性質を損なうことなく任意の形状に、その構成単位である原子のオーダの精度で仕上げることであ

る。つまり、幾何学的、表面物性的鏡面を得ることである。ここでは、その一つの方法である Elastic Emission Machining の加工現象が異種材料間の原子間相互作用に基づく原子オーダの極微小量弾性破壊現象によるものであり、その加工により得られた表面にはほとんど格子欠陥が生じていないこと、また、EEM を利用した超精密数値制御加工法により任意曲面を高精度に仕上げることが可能であることを紹介した。

参考文献

- 1) 森 勇蔵：精密機械，46，6 (1980) 649.
- 2) 森 勇蔵，津和秀夫，杉山和久：精密機械，43，5 (1977) 542.
- 3) 森 勇蔵，山内和人：日本学術振興会第 145 委員会研究会資料，23 (1983) 19.
- 4) 森 勇蔵，杉山和久，山内和人：昭和59年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1984) 769.
- 5) Y. Mori, K. Sugiyama and T. Okuda: Proc. 3rd Int. Conf, Prod, Engg, (1977) 337.
- 6) 森 勇蔵，井川直哉，奥田 徹，杉山和久：精密機械，46，12 (1980) 1537.
- 7) Y. Namba and H. Tsuwa: Proc. 4th ICPE, Tokyo (1980) 1017.
- 8) 森 勇蔵，井川直哉，杉山和久，森 康修，中川正弘：昭和52年度精機学会春季大会学術講演会前刷 (1977) 501.