

# 極微小量加工の思索

大阪大学工学部講師 明 田 勇 蔵

## 1. はじめに

加工における最小単位は原子のオーダー ( $10^{-8}$  ~  $10^{-7}$  cm) と考えられる。このような原子単位の加工を実現しているのは、電解研磨、化学研磨など電気化学的加工法であり、これらは原子の結合を分離するに要するエネルギーを電気化学的に与えることによって達成している。また、電子ビーム加工やレーザー加工などは、電子の運動エネルギーや光のエネルギーを被加工物の微小部分に与えて熱エネルギーに変換し、原子のエネルギーレベルを上げることによって原子の分離を容易にし、溶融、拡散、蒸発などの現象を生ぜしめて加工しようとするものである。いずれにしても、原子の分離に必要なエネルギーを何んらかの方法によって与えることによって原子のオーダーの単位で加工を物理的に行ない得る現象を利用していると言える。(ただし実際の加工においては、それほどよい精度は実現されていない。その理由は、前者の電気化学的方法においては、材料の不均一性のために選択的加工がなされるためであり、後者の物理的加工では、エネルギーの供給される領域が大きく、溶融現象が優先して原子のオーダーの加工が技術的に不可能であると考えられる。)

このように原子のオーダーの加工を機械的方法によって実現できれば、加工精度を大幅に向上させることが可能になる。しかし、従来の機械的加工の概念からすれば、その加工機構が塑性変形による場合は、転位の移動、集積によるクラックの発生にもとづく変形、破壊によるものであり、また脆性破壊(へき開)による場合は先在的な微小クラックに端を発した破壊となり、いずれにしても破壊の単位は、転位や微小クラックの分布に依存する訳で、原子のオーダーの加工単位にはほど遠いものと考えられる。ところが機械的加工法によって、数原子あるいは数十原子の大きさの破壊は不可能であるという

結論がでている訳ではなく、ここで、転位やクラックに依存しない極微小量の機械的加工の可能性を追求し、新加工法を思索しようとするものである。

## 2. 極微小量弾性破壊の可能性

一般に材料学の方面で破壊と称される場合は、単結晶、多結晶を問わず(ウイスカのような微細な単結晶を除いて)、材料内に無数の点欠陥、転位、クラックなどが存在する場合について議論され、その破壊機構は、結晶粒内破壊にかぎると次のようなものに大別される。

### 1) へき開破壊

#### (a) 脆性へき開破壊

先在的微小クラックの先端における応力集中によって結晶のへき開面で引張り破壊が生ずる場合で、応力集中が非常に大きく、ほとんど転位の移動、増殖をとまなわぬ場合である。いわゆる脆性材料と称されるものに起こる破壊現象である。

#### (b) 延性へき開破壊

金属材料では、ほとんど微小クラックの先在は考えられず、力によって必ず塑性変形を生じ、転位の移動、増殖、集積の経過をたどる。その転位の集積部に微小クラックが発生し、その先端に応力集中を生じてへき開面で引張り破壊が生ずる場合である。微小クラックの発生機構については、種々の説があり、定説がないようである。

### 2) せん断型破壊

すべり面上を転位がどんどん移動することによってせん断変形が進行し、破断まですべり変形のみが支配する場合である。

以上のように材料強度学的に破壊を見た場合、材料が全体に一律な強度をもっているのではなく、材料内の欠陥が強度を支配するのである。このような材料内の欠陥の量は加工変質を受けていない状態で、転位で  $10^{10}$  ~  $10^8$  個/cm<sup>2</sup>

以内、微小クラックで $10^6$ 個/cm<sup>2</sup>以内であるから、その分布の間隔はそれぞれ0.1~1 $\mu$ 以上および10 $\mu$ 以上となる。また、それぞれの欠陥の1個の大きさは、数原子~数百原子のオーダーと考えられるから、欠陥のしめる体積は、全体積に比べて微小なものである。

ここで、従来の切削、研削、ラッピング(0.1 $\mu$ 程度以下の粒径の粉末を使用する場合の鏡面ラッピングは除く)などの機械的加工を考えると、その切刃の大きさ、加工単位の大きさから言って、応力場は先在する転位やクラックの間隔よりはるかに大きい領域に達するので、その変形、破壊機構は、上述の欠陥にもとづくものであることは言うまでもない。それゆえ、これらの加工法による到達加工精度は、転位の増加やクラックの発生によって生ずる転位やクラックの存在する最小の間隔までであろう。しかるに、先在する転位やクラックの存在しない微小部分に、何んらかの機械的方法によって、選択的に力を加え、先在する転位を移動させたりクラックを発生させたりせずに原子間の引力をひきさく弾性的な微小破壊をおこさせることができれば、その最小の破壊単位は、原子のオーダーまで到達できると考えられる。ただし、その場合に問題となるのは、先在する転位やクラックのない領域に力を加えた場合、新しく転位やクラックが発生する可能性があり、その破壊機構が転位やクラックにもとづくものになってしまうのではないかとということである。

1) —(a)の先在クラックによって脆性へき開破壊をおこすような脆性材料において、先在クラックの存在しない部分に塑性変形をとまなわずにクラックが発生するということは、とりもなおさず、弾性破壊の可能性を意味するのであるから、クラックの発生について問題となるのは、延性へき開破壊をおこすような材料についてである。しかし、この場合のクラックの発生も転位の移動、集積によるものであるから、究極は転位の発生の有無が問題となるのである。

転位の増加については、増殖と発生 の二つの機構が考えられる。転位の増殖というのはFrank-Read源など先在する転位をもとにして

新しく転位ができる場合を言い、塑性変形過程における転位の増加は、この増殖作用による場合がほとんどあるというのが定説である。転位の発生については、結晶粒界や夾雑物の界面からの発生が観察されているが、材料表面からの転位の発生は、薄膜については可能であるが、大きい体積をしめるものでは、表面からの転位の発生は考えられないということであり、転位の発生についての定説はないようである。

このように考えると、先在する転位の間力を加える場合の転位の発生の可能性は少なく、さらに、転位の存在しない微小領域が弾性的破壊を生じやすいような力のかけ方を考えれば、極微量弾性破壊が可能ではないかと考えられる。例えば、加工を施そうとする材料表面は、微視的には凹凸に富み、原子のオーダーで見れば

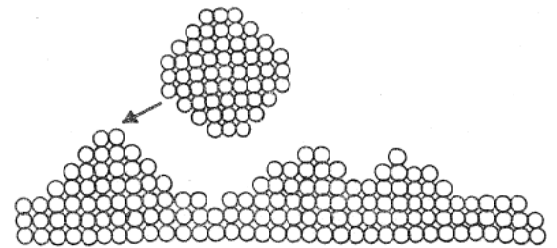


図1 工作物表面の原子オーダーの模型とその加工

図1のようになっていると思われる。この原子のオーダーの凸部に、水平方向の力が加わったとき、弾性的な引張り破壊やせん断破壊がおこる可能性が大である。

ここで、弾性的な引張り破壊とせん断破壊における理想強度 $\sigma_{max}$ 、 $\tau_{max}$ を図2に示す単純なモデルについて求めると、引張り破壊の場合

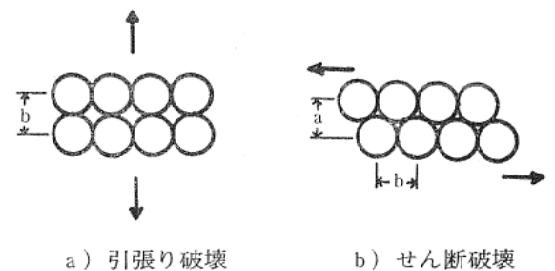


図2 原子間の引張り破壊およびせん断破壊の模型

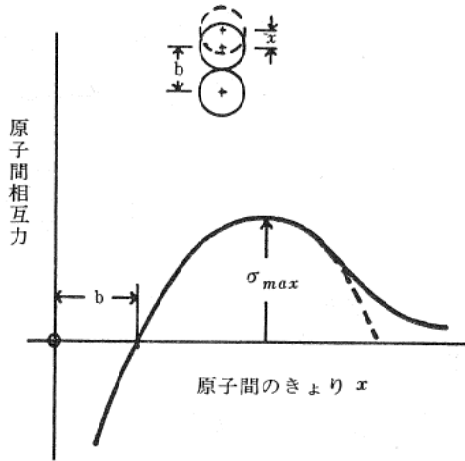


図3 引張りにおける原子間相互力

は、図3における原子間相互力

$$\sigma = \sigma_{\max} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (1)$$

に抗して原子を引き離すに要するエネルギー

$$W = \int_0^{b/2} \sigma_{\max} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx = \frac{\lambda \sigma_{\max} a}{\pi} \quad (2)$$

となり、これが新しくできる面がもつ表面エネルギーに  $2\gamma$  に等しいことから、

$$\frac{\lambda \sigma_{\max}}{\pi} = 2\gamma \quad (3)$$

となり、一方  $x \ll b$  において Hooke の法則が成り立ち、弾性率を  $E$  とすれば、

$$\sigma = E \frac{x}{b} = \sigma_{\max} \cdot \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (4)$$

であることから、

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\frac{\gamma E}{b}} \quad (5)$$

を得る。

また、理想的なせん断強度  $\tau_{\max}$  についても同様に、せん断における原子間相互力 (図4) を

$$\tau = \tau_{\max} \sin \left( \frac{2\pi x}{b} \right) \quad (6)$$

とにおいて、 $x \ll b$  に対して、Hooke の法則が成り立つことから、剛性率を  $G$  とすれば、

$$\tau = G \frac{x}{a} = \tau_{\max} \cdot \frac{2\pi x}{b} \quad (7)$$

であることから、

$$\tau_{\max} = \frac{b}{a} \cdot \frac{G}{2\pi}$$

となる。

(5), (8) 式から計算される  $\sigma_{\max}$  や  $\tau_{\max}$  は実測値の数百倍から数千倍におよぶのであるが、このような大きな応力 (面力として考えるのは妥当ではないが) が働いた場合に転位が発生するかどうかは問題で、その点については材料学的にも明らかでない。ここで注目に値するのは、強度は大であるが、破壊に要するエネルギーは、数~数十  $\text{erg}/\text{mm}^2$  ときわめて小さいことである。

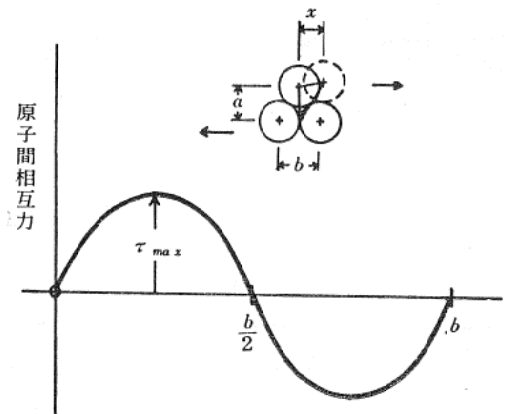


図4 せん断における原子間相互力

### 3. 極微量加工の一試み

前述のような、極微量弾性破壊の可能性があるかどうかを明らかにする実験的手法を考えなければならない。極微量弾性破壊が起り得る加工法として、ここでは特殊振動加工法を考え、それによって種々の材料を加工し、その仕上量の測定、加工表面の顕微鏡的観察、極表面変質層の観察などからその破壊機構を考察しようとするものである。

#### 3.1 特殊振動加工法

先在する転位の間を選択的に、機械的な方法によって破壊させることは容易にできるものではない。しかし、先端半径が  $0.1 \sim 0.01 \mu$  以下の触針で材料表面を軽く引掻いた場合、その接触円の半径は  $0.01 \mu$  以下になり得る。この場合、転位密度を  $10^8/\text{cm}$  としても、転位間隔は  $1 \mu$  となり、触針先端が転位に衝突する確率は非常に小さい。このように考えると、非常に先端半径の小さな工具で材料表面に力を加えれば、ほとんど

ど先在する転位を動かさずに転位のない部分を加工することになる。しかし、このような微細な先端をもつ工具を得ることは不可能であるので、工具として微細な粉末粒子 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  粉末,  $20\mu$ ,  $8\mu$ ,  $2\mu$ ) を用いたのであるが、従来のラッピングのように垂直荷重をかけると変形には寄与するが、弾性破壊には役立たない応力場ができるので、粉末粒子が材料表面に平行に作用するように、図5に展す特殊振動加工装置(

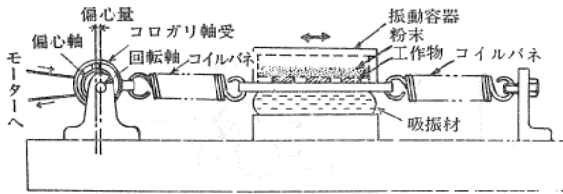


図5 特殊振動加工装置の概略

表1 加工用材料

| 材   | 質           | 結晶構造   | 加工面   |
|-----|-------------|--------|-------|
| 単結晶 | シリコン (Si)   | ダイヤモンド | {111} |
|     | 鉄 (Fe)      | 体心立方   | {110} |
|     | アルミニウム (Al) | 面心立方   | {111} |
| 多結晶 | 軟鋼 (S15C)   | 体心立方   | —     |
|     | 硬鋼 (S45C)   | 体心立方   | —     |
|     | アルミニウム (Al) | 面心立方   | —     |

振動数  $f=30$  c/sec 振幅  $r_v=0.4$ cm) によって加工を試みている。また、工作物としては表1に示す材料を用いている。

### 3.2 加工量の測定および加工表面、極表面変質層の観察

加工量の測定は、図5に示す工作物の表面の1部をプラスチックテープで覆い、加工後にその高さの差を仕上面あかさ測定器で測定して求めている。その1例を図6に示す。

また、本実験の加工機構を直接観察することは不可能であるので、加工表面の変化を微分干渉顕微鏡および電子顕微鏡 (100KV) により観察するとともに、破壊機構を考察する上で重要な極表面層の結晶学的構造を把握するため、単結晶試料について電子回折像 (100KV) を得ている。

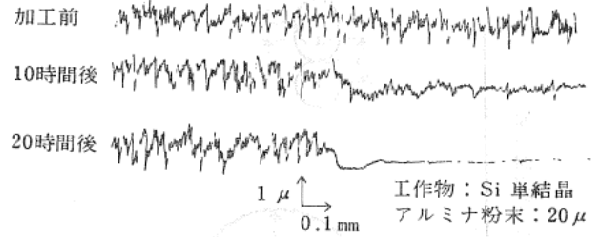


図6 加工量の測定例

## 4. 加工量からの検討

本実験方法では、振動によって粉末粒子と工作物との間に水平な相対変位を生じさせ工作物表面の凹凸末粒子を衝突させて加工を行なうとするものである。それゆえ、衝突時におけるエネルギーや力が問題となる。本実験において、粉末粒子1個がもつ最大の運動エネルギーは、

$$W = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{2}{3} \pi \rho r^3 v^2 \quad (9)$$

$m$ : 粉末粒子1個の質量

$v$ : 最大の相対速度

$\rho$ : 粉末材料の密度

$r$ : 粒子半径

で、このエネルギーがすべて弾性的な破壊による新しい面の生成に費やされるとすれば、その破壊の面積  $A$  は、

$$W = \frac{1}{2} m v^2 = 2rA \quad (10)$$

より求められる。しかし、粉末粒子が衝突して破壊が生ずるまでに、粒子がもつエネルギーが弾性的なエネルギーとして工作物の微小部分に蓄えられてゆき、ある部分での弾性的なエネルギーまたは力(応力)がある値に達したとき破壊が生ずると考えるべきである。この衝突時の接触面積、力、応力、については Hertz の弾性接触問題として取り扱うことができる。

いま、図7に示すように速度  $v$  で運動する半径  $r$  の粒子(剛体)がヤング率  $E$ 、ポアソン比  $\nu$  の平面に衝突した場合、運動のエネルギー  $W$  が弾性的エネルギー  $U$  に変換されてゆき、接触円半径  $a_0$ 、力  $P_0$  になったとき粒子の速度が0

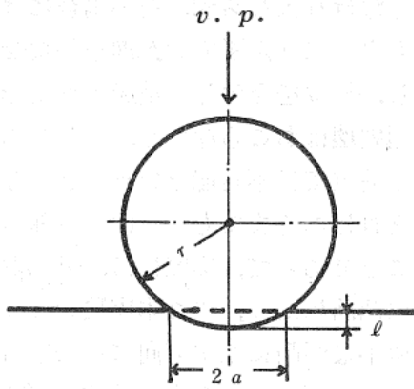


図7 球が平面に衝突したときの弾性変形 (Hertz の理論, 球: 剛体)

になったとすれば,

$$U_0 = \int_0^{l_0} P dl \quad (11)$$

で与えられ,  $W=U_0$  となる. このとき,

$$l = r - \sqrt{r^2 - a^2} \approx \frac{a^2}{2r} \quad (12)$$

であり, Hertz の式から,

$$a = KP^{1/3} r^{1/3} \quad (13)$$

$$K = \left\{ \frac{3}{4} \left( \frac{1-\nu}{E} \right) \right\}^{1/3}$$

であるから, 式(11)は,

$$U = \frac{1}{5} K^2 P_0^{5/3} r^{-1/3} \quad (14)$$

となり, (9)式と等しいとおけば

$$P_0 = \left( \frac{10}{3} \pi \right)^{3/5} \rho^{3/5} K^{-6/5} r^{2/5} v^{6/5} \quad (15)$$

$$a_0 = \left( \frac{10}{3} \pi \right)^{1/5} \rho^{1/5} K^{3/5} r v^{2/5} \quad (16)$$

を得て, そのときの接触面での平均応力  $\sigma_m$  は,

$$\sigma_m = \frac{P_0}{\pi a_0^2} = \left( \frac{10}{3} \right)^{1/5} \pi^{-4/5} \rho^{1/5} K^{-12/5} v^{2/5} \quad (17)$$

となる.

ここで, 衝突時に塑性変形が生じるかどうかを考察してみよう. 上式から求められる  $a_0, P_0$  は粉末粒子が衝突した場合の最大値を示すもので, 各粉末粒子径について, Fe, Al, Si に対する  $a_0, P_0$  の値を具体的に計算すると表2のようになる. まず, 接触円の直径は, Fe, Al, Si ともあまり差はなく,  $20\mu$  の粒子の場合で  $0.7 \sim 0.9\mu$ ,  $8\mu$  の粒子で  $0.3 \sim 0.4\mu$ ,  $2\mu$  の粒子で  $0.07 \sim 0.09\mu$  となり, Fe や Al の転位密度を  $10^8$  個/cm<sup>2</sup> とすれば, 転位間隔は  $1\mu$  となり,  $20\mu$  や  $8\mu$  の粒子では, その可能性は少ないと言える. しかるに Si 単結晶のように転位密度の非常に小さなものでは (本実験で用いたのは  $10 \sim 10^2$  /個 cm<sup>2</sup>), 塑性変形は生じないと言える. つまり表2に示すように, 応力的には, 接触面の平均応力で, Fe……………370kg/mm<sup>2</sup>, Al……………180 kg/mm<sup>2</sup>, Si …… 340kg/mm<sup>2</sup> と高応力態になるのであるから, 先在する転位を動かしたり, 増殖したりして, 塑性変形する可能性があるが, 接触する面積が先在する転位間隔に比

表2 アルミナ粉末粒子が種々の材質の平面に衝突したときの最大接触半径, 最大荷重, 最大平均応力(計算値)

| アルミナ粉末粒子                       |                                          | 平均粒子径 $2r$                             | ( $\mu$ )             | $20\mu$              | $8\mu$               | $2\mu$                |
|--------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| $\rho = 4.1$ g/cm <sup>3</sup> |                                          | 粒子1個の質量 $m = \frac{4}{3} \pi \rho r^3$ | (g)                   | $1.6 \times 10^{-8}$ | $1.0 \times 10^{-9}$ | $1.6 \times 10^{-11}$ |
| $r = 0.4$ cm                   |                                          | 最大運動速度 $v = 2\pi r v f$                | (cm/sec)              | 75                   | 75                   | 75                    |
| $f = 30$ c/sec                 |                                          | 最大のエネルギー $W = \frac{1}{2} m v^2$       | (erg/個)               | $4.0 \times 10^{-3}$ | $2.6 \times 10^{-4}$ | $4.0 \times 10^{-6}$  |
| 工<br>作<br>物                    | 鉄                                        | $A (W = 2rA \text{より})$                | ( $\mu^2$ )           | $2.0 \times 10^2$    | $1.3 \times 10^1$    | $2.0 \times 10^{-1}$  |
|                                | $r = 10^3$ ery/cm <sup>2</sup>           | 衝突時の最大接触半径 $a_0$                       | ( $\mu$ )             | $3.8 \times 10^{-1}$ | $1.5 \times 10^{-1}$ | $3.8 \times 10^{-2}$  |
|                                | $E = 2.1 \times 10^4$ kg/mm <sup>2</sup> | 衝突時の最大荷重 $P_0$                         | (g)                   | $1.7 \times 10^{-1}$ | $2.6 \times 10^{-2}$ | $1.7 \times 10^{-3}$  |
|                                | $\nu = 0.30$                             | 衝突時の最大平均応力 $\sigma_m$                  | (kg/mm <sup>2</sup> ) | $3.7 \times 10^2$    | $3.7 \times 10^2$    | $3.7 \times 10^2$     |
|                                | アルミニウム                                   | 衝突時の最大接触半径 $a_0$                       | ( $\mu$ )             | $4.5 \times 10^{-1}$ | $1.8 \times 10^{-1}$ | $4.5 \times 10^{-2}$  |
|                                | $E = 7.3 \times 10^3$ kg/mm <sup>2</sup> | 衝突時の最大荷重 $P_0$                         | (g)                   | $1.2 \times 10^{-1}$ | $1.8 \times 10^{-2}$ | $1.2 \times 10^{-3}$  |
| 物                              | $\nu = 0.34$                             | 衝突時の最大平均応力 $\sigma_m$                  | (kg/mm <sup>2</sup> ) | $1.8 \times 10^2$    | $1.8 \times 10^2$    | $1.8 \times 10^2$     |
|                                | シリコン                                     | 衝突時の最大接触半径 $a_0$                       | ( $\mu$ )             | $3.9 \times 10^{-1}$ | $1.6 \times 10^{-1}$ | $3.9 \times 10^{-2}$  |
|                                | $E = 1.7 \times 10^4$ kg/mm <sup>2</sup> | 衝突時の最大荷重 $P_0$                         | (g)                   | $1.6 \times 10^{-1}$ | $2.5 \times 10^{-2}$ | $1.6 \times 10^{-3}$  |
| $\nu = 0.26$                   | 衝突時の最大平均応力 $\sigma_m$                    | (kg/mm <sup>2</sup> )                  | $3.4 \times 10^2$     | $3.4 \times 10^2$    | $3.4 \times 10^2$    |                       |

べて小さければ、転位を動かす確率が非常に小さくなるということである。ここで新しく転位が発生するかどうかが問題であるが、そのためにはせん断応力が理想的せん断強度に達する必要がある、Hertz のモデルに対して、吉川が計算しているところによれば、Ge で、粒子直径  $20\mu$  で  $240\text{g}$ 、 $2\mu$  で  $2.4\text{g}$  の荷重で転位が生ずるということになり、本実験におけるように、荷重が  $20\mu$  で、 $0.12\sim 0.17\text{g}$ 、 $2\mu$  で  $0.0012\sim 0.0017\text{g}$  と三桁も低い場合には全く転位が発生する可能性がないということになる。

このように考えると粒子径が小さく、衝突時の荷重が小さければ、転位の増殖、発生がおこらず、塑性変形も生じないということになるが、そのような小荷重で、極微小破壊がおこるかどうかは疑問である。吉川によれば平面と球の接触の Hertz のモデルでは、理想的へき開破壊が起こるように高応力にしようとするれば荷重

を大きくしなければならず、その場合には引張応力よりもさきにせん断応力が理想的なせん断強度に達し、転位が発生し、結局塑性変形して微小へき開破壊はおこらないし、まして本実験のように小荷重では不可能ということになる。しかし、それはあくまでも真平面と真球の接触の場合のことであって、実際には、平面および球の表面は凹凸に富み、また本実験のように、平面上の微小な凹凸に水平方向に粒子を衝突させた場合には(図1)、微小弾性破壊(理想的なせん断破壊またはへき開破壊)が可能ではないかと考えられる。

本実験のように粉末粒子を振動させ、極微小荷重の衝突をくり返すように加工が進行し、その加工時間と加工量の関係は図8に示すようである。加工速度は、平均的には Si で  $12\sim 16\text{\AA}/\text{min}$ 、Al で  $1\text{\AA}/\text{min}$  と極端に小さく、極微小量加工の可能性を示している。

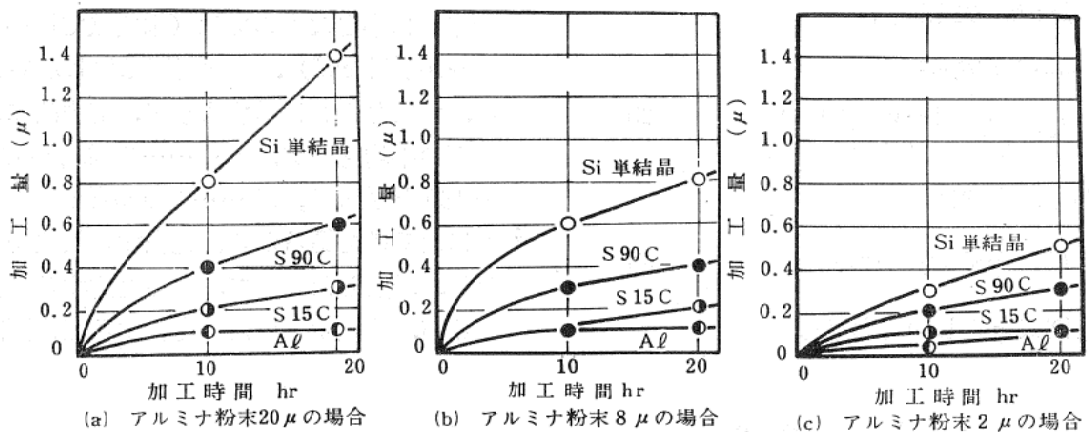


図8 特殊振動加工による加工量

## 5. 加工表面および加工表面層の観察

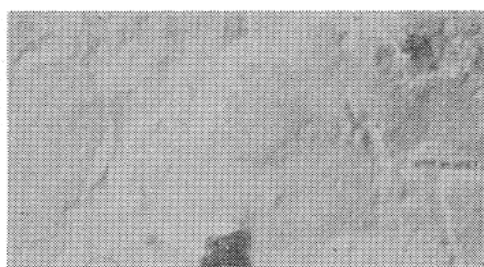
### 5.1 Fe 単結晶の場合

図9は、Fe 単結晶の {110} 面をアルミナ粉末 ( $8\mu$ ) で振動加工した場合の加工面の変化の状態を示すものである。化学研磨された前加工面が平坦に加工されてゆく様子がよくわかるが、加工が塑性活動によるものか、微小破壊によるものかは明らかでない。

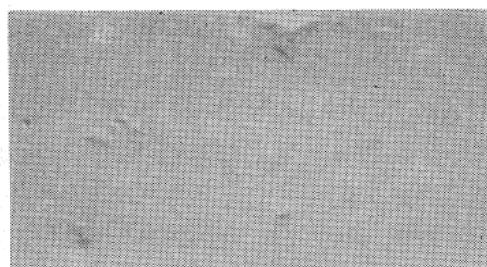
そこで、化学研磨面を、 $20\mu$ 、 $8\mu$ 、 $2\mu$  のアル

ミナ粉末で振動加工した場合の極表面層の電子回折像を観察し、それから加工機構を考察しようとしたのが図10である。化学研磨された前加工面の電子回折像は、単結晶であることを明らかに示すスポットが現われている。これを  $20\mu$  の粉末で加工すると、多結晶の回折環が現われる(図10(b))。ところが、この回折環は計算上  $\gamma$  鉄(面心立方晶)の回折環に一致する。Wilmanらの実験でも Fe 単結をエメリーペーパーで仕上げた場合、表面層に  $\gamma$  鉄を生ずるという報告があることから、本当に  $\gamma$  鉄かどうかは別に

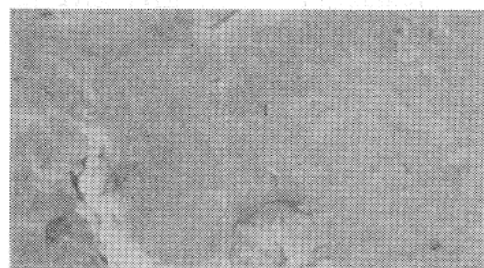
1  $\mu$



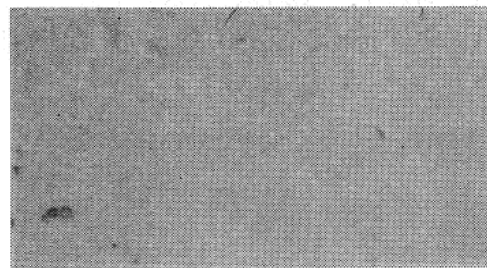
(a) 前加工面 (化学研摩)



(c) 20 時間加工

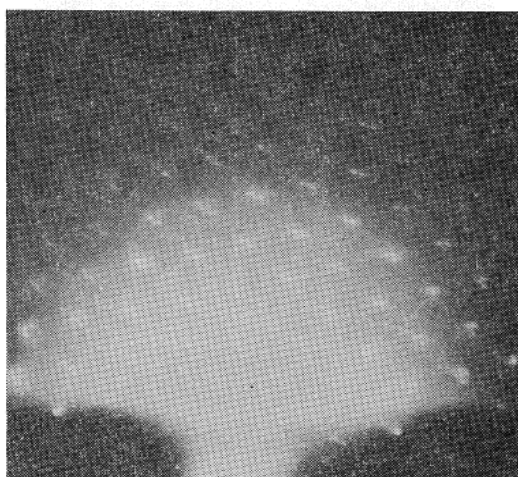


(b) 10 時間加工



(d) 40 時間加工

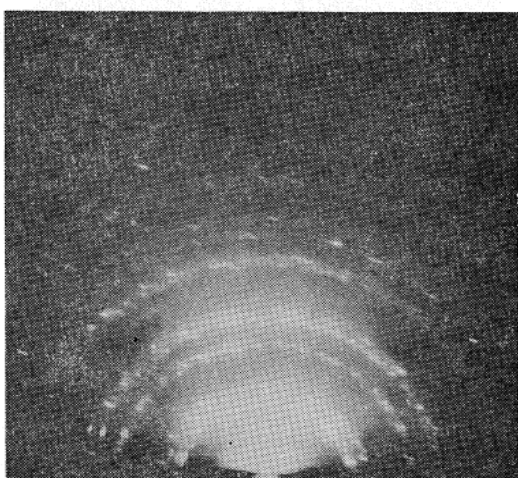
図9 Fe 単結晶の特殊振動加工面 {110} (アルミナ粉末 8  $\mu$ )



(a) 前加工面 (化学研摩)



(c) アルミナ粉末 8  $\mu$ , 40 時間加工



(b) アルミナ粉末 20  $\mu$ , 40 時間加工



(d) アルミナ粉末 2  $\mu$ , 40 時間加工

図10 Fe 単結晶の特殊振動加工面 {110} の電子回析像

しても本実験においても熱の影響が大きく、かなり大きな塑性変形が生じていると言える。ところが、 $8\mu$ の粉末で振動加工すると、図10(c)の $\alpha$ 鉄(体心立方晶)の回折環を得る。それゆえ $8\mu$ の場合は $20\mu$ よりかなり塑性変形の程度が少なく、発熱の影響をあまりうけていないと言えるが、なおかつ、かなりの塑性変形がある。しかし、 $2\mu$ の粉末では、図10(d)のように、回折環は見られず、単結晶のスポットおよびその菊池線が観察されることから、ほとんど塑性変

形が生じていないのではないかと考えられる。

このように粉末粒子径を小さくすればするほど結晶の乱れが少なくなり、それでも加工が進行することから極微量弾性破壊の可能性を見ることができる。

## 5.2 Al の場合

Al 多結晶の圧延された面および化学研摩面をそれぞれ振動加工すると、図11 図12 に示すようにしてゆく。前者は $20\mu$ の粉末で、後者は

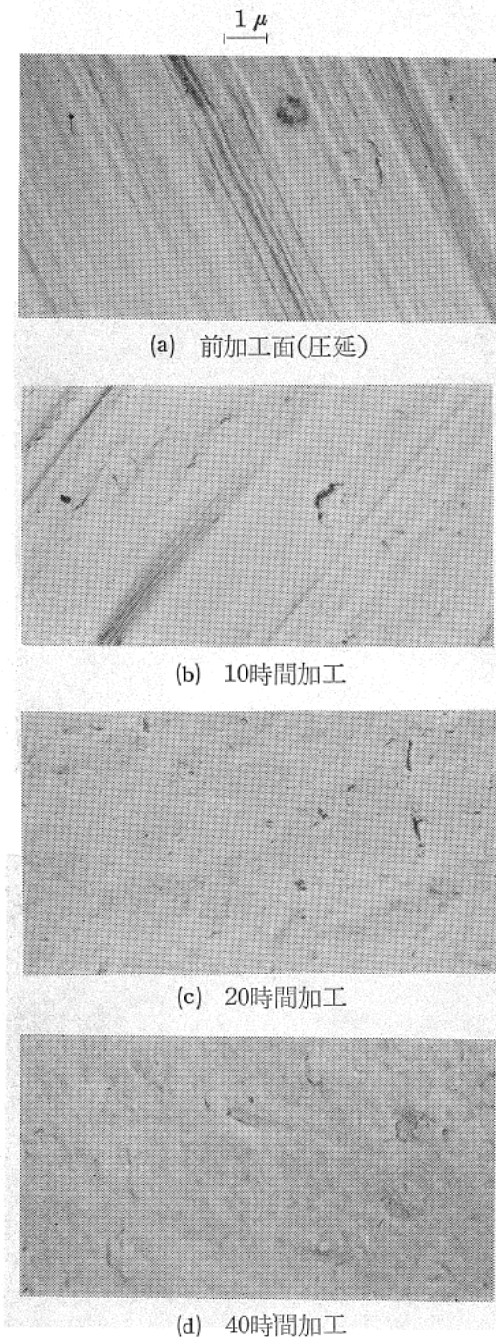


図11 Al 多結晶の特殊振動加工面 (アルミナ粉末 $20\mu$ )

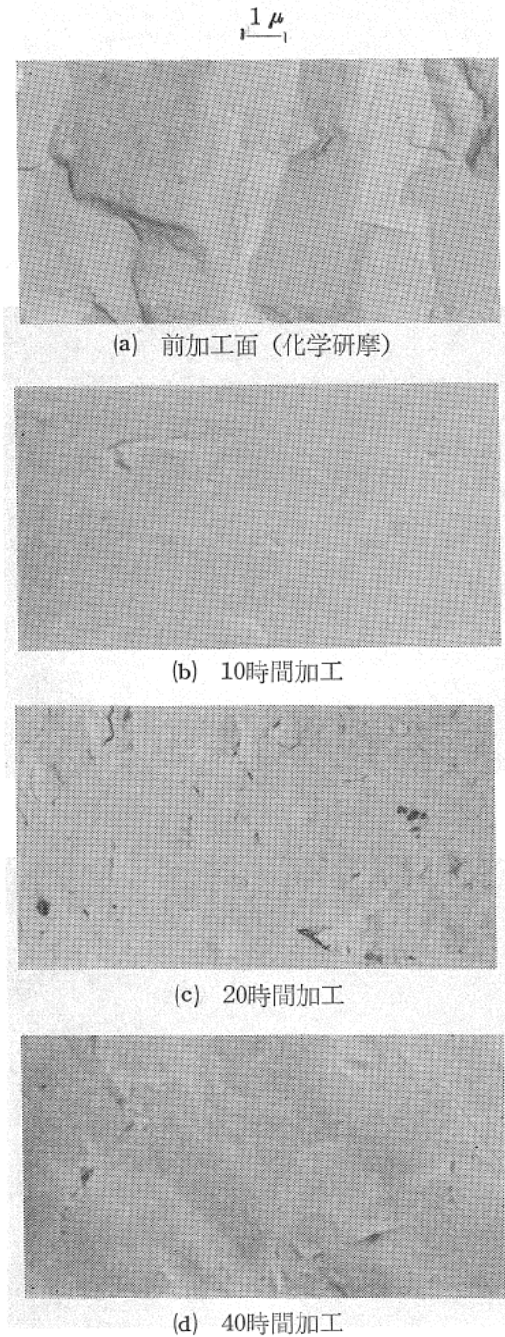


図12 Al 多結晶の特殊振動加工面 (アルミナ粉末 $8\mu$ )



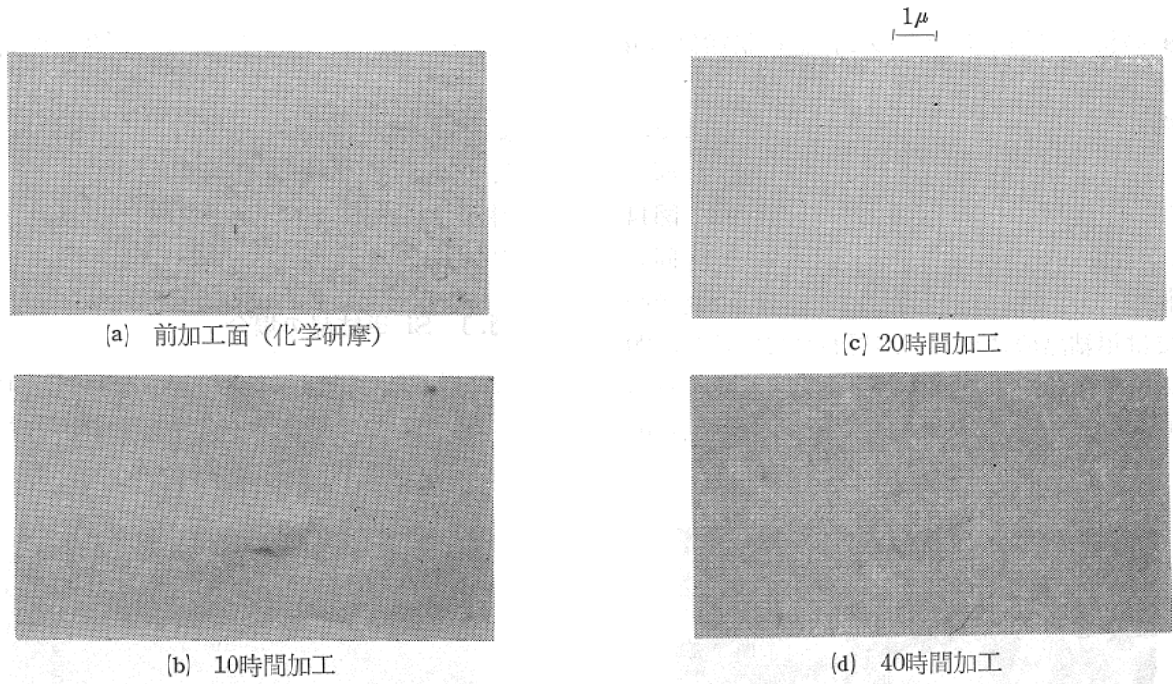


図13 単結晶の特殊振動加工面 {111} (アルミナ粉末 8 μ)

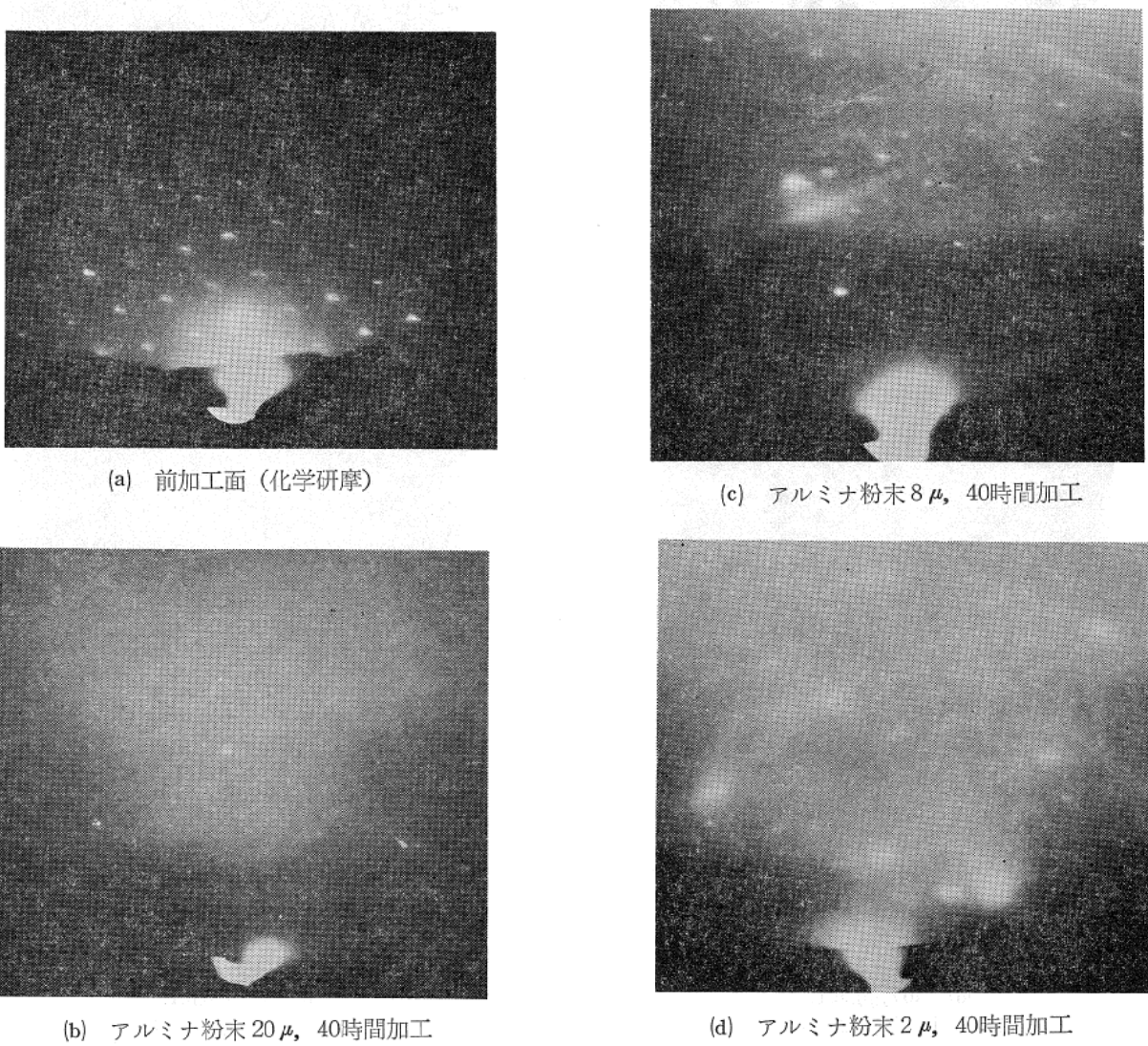


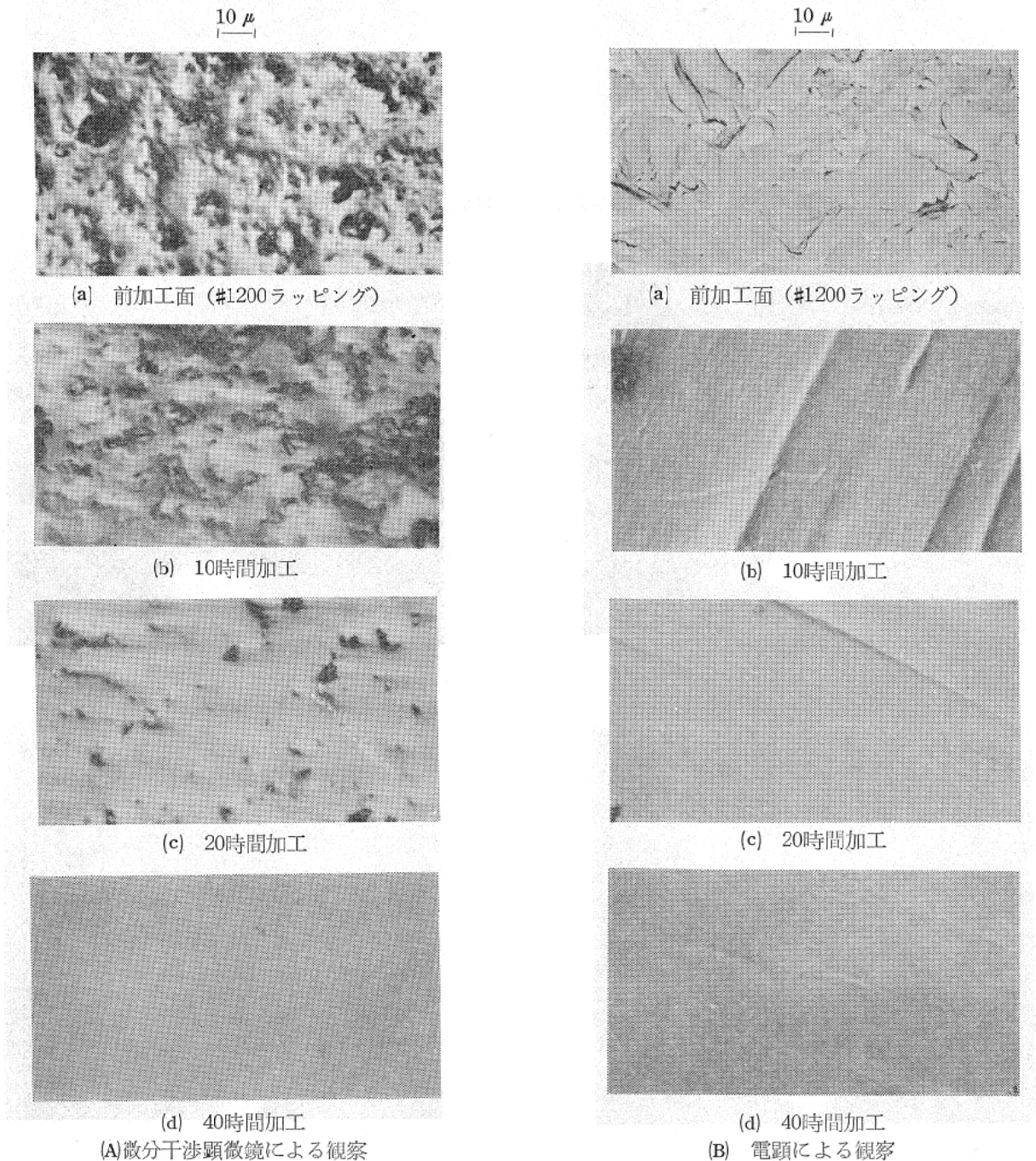
図14 Al 単結晶の特殊振動加工面 {111} の電子回折像

8 $\mu$ の粉末で加工したもので、面の状態は8 $\mu$ の方が良いようである。しかし、いずれにしても塑性流動的な加工のように見える。そこで、Al単結晶の{111}面を振動加工し、仕上面と加工表面層を観察したのが、図13、および図14である。単結晶の場合でも図12の多結晶と同じ様相を呈する。電子回折像は図14(a)の化学研磨面では単結晶のスポットが現われているが、20 $\mu$ の粉末で加工すると結晶性を失ったハローが生じ、8 $\mu$ では、多少スポットらしいものが現

われてくるがまだ塑性変形が支配的である。さらに2 $\mu$ になるとスポットが明瞭になり、菊池線も生じ、結晶の乱れが少ないことを示している。0.1 $\mu$ 以下の粉末で加工すれば、極微量弾性破壊が可能になるとも考えられ、興味深い点である。

### 5.3 Si単結晶の場合

Si単結晶は、本実験で用いた材料の中で、もっとも脆性であり、転位密度も数10~数10<sup>3</sup>



(A) 微分干渉顕微鏡による観察

(B) 電顕による観察

図15 Al単結晶の特殊振動加工面{111}(アルミナ粉末20 $\mu$ )

個/cm<sup>2</sup> と非常に少なく、極微量弾性破壊の可能性のもっともある材料である。Si 単結晶の {111} 面をラッピング (#1200) した前加工面を 20 $\mu$  のアルミナ粉末で振動加工したときの仕上面の変化の状態を微分干渉顕微鏡で観察したのが図 15 (A) であり、その細部の状態を電顕観察したのが 図 15 (B) である。

図 15(A) から明らかなように、加工面の凸部から光学的には鏡面に加工されてゆく様子が明らかである。その細部は図 15(B) のように、前加工面は貝殻状の破面の集積であるのが、振動加工によって微細な条痕の集積によって加工が進行し、面が平坦化してゆく。しかし、20 $\mu$  の粉末では、図 15 (B)(b)(c)(d) に見られるようにかなり大きな条痕が観察され、その加工単位が大きいことを示しているが、図 16 に見られるように、8 $\mu$  の粉末では、条痕が電顕的にも観察されず

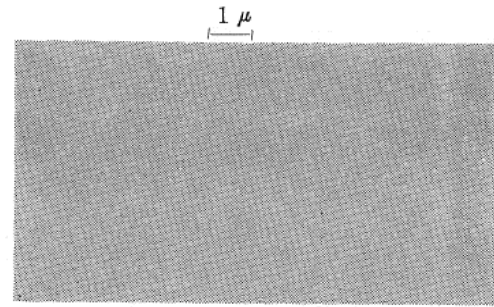
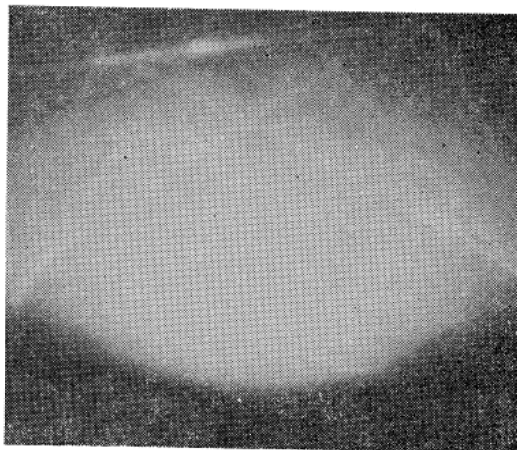
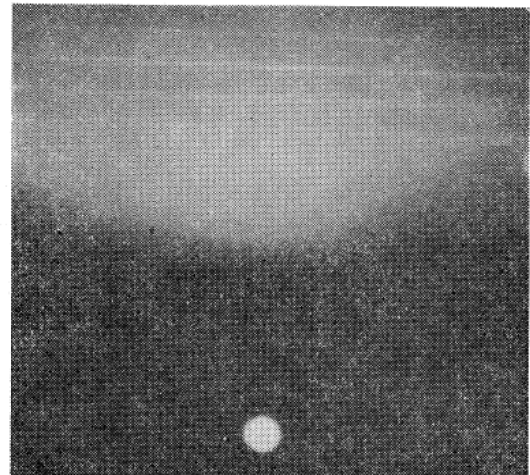


図 16 Si 単結晶の特殊振動加工面 {111}  
(アルミナ粉末 8 $\mu$ , 40時間加工)

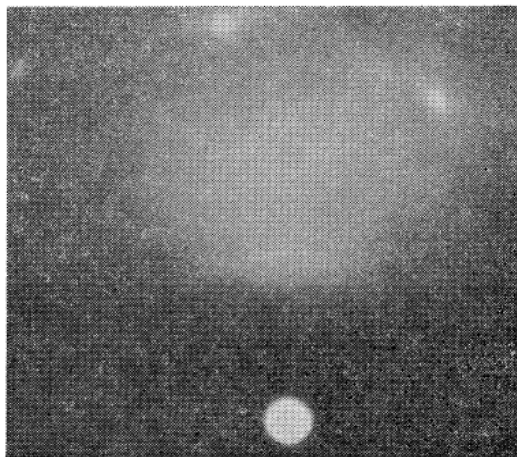
加工単位が極微量であることを示している。これらの加工表面層の電子回析像は図 17 のようである。20 $\mu$  の粉末では単結晶のスポットが現われるが、多少塑性変形をともなっているようであるが、8 $\mu$  や 2 $\mu$  の粉末では、化学研磨面と変わらないシャープな菊池線が現われ、電子回析的には結晶の乱れはない。それゆえ、加工量、電子顕微鏡観察、電子回析像から Si 単結晶については極微量弾性破壊が生じていると言える。



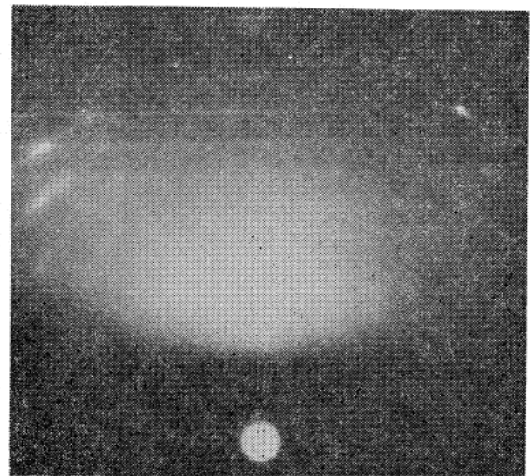
(a) 加工面 (化学研磨)



(c) アルミナ粉末 8 $\mu$ , 40時間加工



(b) アルミナ粉末 20 $\mu$ , 10時間加工



(d) アルミナ粉末 2 $\mu$ , 40時間加工

図 17 Si 単結晶の特殊振動加工面 {111} の電子回析像

## 6. む す び

極微量弾性破壊の可能性を論じ、それに関する実験を行なうことによって、その可能性を明らかにしてきたが、Si単結晶のようなもともと脆性な材料では、極微量弾性破壊が生じると言うては問題ないようであるが、Fe, Al, のような延性材料では、断言できない結果におわっている。しかし、極微量弾性破壊は、先在する転位の密度や転位の発生しやすさに関連するものであり、粉末粒子を微小にすることによって達成できるものと考えられる。このような加工法を創造することにより、加工精度の窮極

と考えられる原子のオーダの加工が達成されるのではないだろうか。

### 参 考 文 献

- 1) 幸田成康：金属物理学序論。コロナ社（1969）。
- 2) 日本金属学会強度委員会編：金属材料の強度と破壊，丸善（1965）。
- 3) 横堀武夫：材料強度学，岩波（1967）。
- 4) 吉川弘之：加工における結晶表面の延性ぜい性挙動，精密機械，35，10（1969），662。
- 5) 津和秀夫，明田勇蔵，村上修一：粉末による特殊振動加工に関する研究，精機学会関西支部定期学術講演会前刷集（1969），37。
- 6) 明田勇蔵，村上修一：極微量加工，高精度，2，1（1970），11。