研究

加工における結晶表面の延性ぜい性挙動*

吉 川 弘 之**

Brittle-Ductile Behavior of Crystal Surface in Finishing

Hiroyuki YOSHIKAWA

In finishing or machining process of crystals, mechanical behavior of the crystals is an important factor that affects the surface texture generated.

In the present paper, the effects of size of stressed part upon mechanical behavior of the part of crystal surface in the process of finishing is investigated theoretically. The sizes are classified into four categories each of which is characterized by the lattice defects existing, that is, dislocations and cracks. Investigation upon the operating predominance of lattice defects for each category revealed the distinction in mechanical behaviors of crystals of each category, when impressed by an indenter. In the crystal of very small size where no dislocation and no crack exists, indentation of tool upon crystal surface gives rise to the generation of dislocation first prior to brittle fracture. In the crystal with only dislocations, where it was revealed that the analysis by the elastic-plastic theory is essential, plastic deformation occurs first, some amount of which allows cracks to nucleate in the deformation zone and to extend into elastic zone giving rise to macroscopic brittle fracture. The forming mechanism of plastically deformed zone around indentation, and size-dependent brittle-ductile transition mechanism are explained. Those studies have made it possible to predict the behaviors of various crystals in finishing process, and to establish some general rules for the selection of finishing method which is optimal for the surface property required.

1. まえがき

仕上面の構造が、加工に際して示す材料の機械的挙動に影響を受けるということは直観的に理解できる。まず、それぞれの加工において、材料がどのような挙動を示すかを知ること、つぎにその挙動がどんな仕上面をもたらすかが問題である。表面がぜい性破壊によって仕上げられれば、仕上面形状はその結晶のぜい性破壊に特有の破面構造の集積として与えられる。その場合、理想的な平滑面は期待できないであろう。しかし加工エネルギーは少なくすみ、加工能率は上がる。一方延性挙動を示せば、面は平滑になるがエネルギー消費は大きく、変質層なども大きくなる可能性がある。この観点からすれば、加工目的によって表面の挙動を人為的に支配する方法を見出すことが望ましい。結晶の延性ぜい性挙動は、巨視的には温度、荷重速度などの影響と関連してかなり調べられているが、加工のように表面付近の、それも小寸法の場合については統一的な考え方はまったくなく、経験的な知識があるだけである。本報では、とくに加工寸

法に着目し、結晶表面の延性ぜい性挙動を決定する機構を考察したものである。

2. 加工単位 of 寸法

加工の種類によって、単位の加工の寸法はいろいろと異なる。鍛造では加工単位は加工物と同じオーダの寸法をもつ。切削ではやや小さく、研削、ラッピング、ポリシングとだんだん小さくなってゆく。一方加工される材料の機械的挙動を決定するものも、応力範囲、あるいは寸法または応力こう配などによって異なってくる。あ

図1 破壊発生部の寸法による破壊に因する因子の違い

*原稿受付 昭和44年3月26日。材料の加工機構と微視的変形破壊機構に関するシンポジウム(昭和41年3月18日)にて発表。

**正 会 員 東京大学工学部(東京都文京区本郷 7-3-1)

るひろがりを持って局部的に分布する応力によって材料を破壊するとき、その破壊挙動に関与すると考えられるものを、応力範囲に対応させて図示すると図1のようになる。図1はそれらの存在する間隔をとったものである。加工機構を支配する機械的挙動を考えるには、図のように4つの領域に分けて考えるのがよい。

3. 延性ぜい性挙動

3.1 領域 (I) —— 原子のオーダー

原子半径あるいは結晶格子間隔は $10^{-8} \sim 10^{-7}$ cm である。この範囲の結晶の挙動は、おそらく格子としての性質を失ってしまうであろう。たとえば数個の原子にある応力をかけて表面から除去することを考えると、これはいわゆる機械的破壊とはかなり異なる挙動を示すであろう。むしろ表面拡散、あるいは蒸発と本質的に同じ現象になる。したがって加工法も機械的手段より、化学研摩などの化学的手段が実際に使われる。しかしポリシングなどでは機械的にも可能かもしれない。とくにかたい物質を、はるかに軟い物質で摩擦する摩擦においては、「機械的表面拡散」のようなものが想像されるし、これを有効に使った加工法も考えるべきである。これは表面拡散の応力依存として解くべき問題であるが、本報の主題とはずれるので省略する。

3.2 領域 (II) —— 転位なしクラックなし

10^{-7} cm 以上では結晶は格子としてふるまうであろう。しかし 10^{-6} 以下では転位も大体ないと考えてよく、クラックもない。したがって欠陥を含まない理想結晶として挙動する。このような結晶を加工するときにはどのような挙動が支配的か。

加工にはいろいろな応力状態を生じるものがある。

たとえば、最大引張応力と最大せん断応力との比がいろいろと変わる。このときは延性ぜい性挙動が加工寸法にたいして一義的にきまらない。最大引張応力の大きくなるような加工では結晶はぜい性的に挙動しやすい。いろいろな加工法をこの観点から分類することが必要であるが、ここでは応力計算のしやすい平面への球の押込みを例として考える。

図2 半無限体に剛体球を押込むときの応力

図2のような剛体球の弾性的押込みでは、最大せん断応力

$$\tau_{\max} = 0.120 \sqrt[3]{\frac{PE^2}{R^2}} \quad (1)$$

が接触円の中心のやや下に生じている。転位が存在しなければ $\tau_{\max}$ が理想的せん断強度 ($\approx G/2\pi$) になると変形して転位が生成する。この荷重 P_{flow} は

$$P_{\text{flow}} = 2.37 \left(\frac{G}{E}\right)^3 ER^2 \quad (2)$$

ν (ポアソン比) = 0.25 では

$$P_{\text{flow}} = 0.152 ER^2 \quad (3)$$

となる。一方へき開破壊は引張応力による。最大引張応力は、

$$\sigma_{\max} = 0.0516 \sqrt[3]{\frac{PE^2}{R^2}} \quad (4)$$

であって接触円上ラディアルに生じる。これが理想的へき開強度 $E/2\pi$ になるとへき開する。へき開を起こす荷重 P_{cleave} は、

$$P_{\text{cleave}} = 29.4 ER^2 \quad (5)$$

となる。したがって転位なしクラックなしの理想結晶に球を押込むと、球の半径によらずかならずはじめに転位が生じ、それ以後の問題は領域 (III) と同じになる。

Ge の例では、 $E = 15.8 \times 10^6$ kg/cm²、 $\nu = 0.25$ で、 $P_{\text{flow}} = 2.4 \times 10^5 R^2$ kg となり、 $R = 1 \mu$ なら $P = 2.4$ g、 $R = 10 \mu$ なら 240 g で転位を生じる。したがって変形の可能性は十分あり、通常のラッピングなどでは領域 (II) の条件下で上述の機構による変形が起こる可能性がある。ここで R を大きくすると荷重は増大するが、通常の結晶の転位間隔から考えて圧子による応力集中部に転位の存在する確率は高くなり転位なしの条件を満たさず、つぎの領域 (III) になってしまう。

3.3 領域 (III) —— 転位ありクラックなし

この領域は、ラッピング、ポリシングなどの加工で現実的な条件であると考えられる。すなわち、砥粒の押しつけなどによって生じる局部的集中応力の範囲が 0.1μ 程度になれば、その中に転位が含まれる可能性が高くなる。したがってここでは、結晶はクラックは含まないが転位を欠陥として含むという条件で挙動する。前節でも明らかになったように、微小寸法では結晶の弾性的性質を無視できない。したがってここでは弾塑性問題としての取扱いを試みる。

球の押込みを、無限遠体中の cavity の拡がりの問題と考える。Hill¹⁾によれば、弾塑性問題としての cavity の拡がりにおいて、弾性部と塑性部との境界は図3において、

図3 無限体中でキャビティが広がるときの弾性域と塑性域

$$\left(\frac{c}{a}\right)^3 = \frac{E}{3(1-\nu)Y} \quad (6)$$

で与えられる。 a : cavity の半径, c : 弾塑性境界, E : ヤング率, Y : 降伏応力, ν : ポアソン比。したがって c/a は, a によらず一定で降伏応力 Y とヤング率 E との比の関数であり, 材料固有である。また cavity 内の圧力 H は,

$$H = \frac{2}{3}Y \left\{ 1 + \ln \left(\frac{E}{3(1-\nu)Y} \right) \right\} \quad (7)$$

われわれの扱う材料で, 常温で巨視的にぜい性破壊するものは降伏応力 Y が求められていないものが多い。そこで上式の H は cavity 内の面圧であるから押込み硬度にひとしいと考える。(6), (7) 式より Y を消去すると,

$$\left(\frac{c}{a}\right)^3 = \frac{2}{9(1-\nu)} \left(1 + 3 \ln \frac{c}{a} \right) \frac{E}{H} \quad (8)$$

となる。この式から, ヤング率と硬度との比 E/H の値によって, c/a すなわち硬度圧こんの周辺への塑性変形の拡がりを与えられることがわかる。結晶の種類によ

図4 キャビティ半径 a と弾塑性境界 c との比 c/a と結晶のヤング率 E と硬度 H の比 E/H との関係。(8) 式による。ポアソン比 $\nu=0.25$ の場合。

てこの E/H は非常に違う。金属結晶では後述するようにこの値が 100 以上であり, 共有結晶では 10~30 である。この c/a の値は, 加工後の加工層の深さをきめる重要な因子であり, この点からも金属と共有結晶との加工性が違ってくる。

(8) 式の c/a と E/H との関係は図4のようなになる。 E/H が 4 付近で $c/a=1$ となるが, このときは塑性変形が生じず, 弾性変形のみで圧こんができることを意味している。しかし Hill の式は近似式なのでこの値は正確でない。 E/H の増加により c/a は急に増加するが, $E/H=100$ 以上ではゆるやかになり, 実在材料では c/a はたかだか 10 程度と考えてよい。

E/H は結晶の何の性質によってきめられるかを考えてみる。 E は弾性的性質であり, H は塑性的性質すなわち転位の mobility によってきまる。転位なしの場合でも, 前項に述べたようにかならず転位が導入されるから転位ありの場合を考えてよい。弾性的性質と転位の mobility との関係は結晶の結合の形式によってほぼきまってしまう。このことは現在, 結合エネルギーを原子位置にたいするポテンシャルで表わしたときの, ポテンシャルの分布形状によると考えられている。金属結合やイオン結合などのように方向性のない結晶では, 正弦的な分布をしていて転位の幅は大きくなるが, 共有結合のように方向性が強い結晶ではポテンシャルの山は鋭くて転位の幅はその原子に局限されてしまう。したがって転位の mobility は低く, 弾性率に変形強度が近付いて来る。Gilman²⁾ の集

表 1

	H_v (kg/mm ²)	E (kg/mm ²)	E/H_v	c/a
Pb	8	1800	225	8.1
Al	25	7400	296	9.5
Cu	53	12000	227	8.1
Ni	80	20400	255	8.5
Ir	180	52000	288	9
Steel	200(Ann) 600(Que)	20900 20900	104 35	5.8 3.7
NaCl	15	4870	348	10.0
LiF	120	11100	92	5.6
MgO	600	24500	41	4.0
TiC	3000	31500	10.5	2.2
Al ₂ O ₃	1950	42000	20.6	3.0
InSb	270	7500	27.8	3.4
GaAs	750	14500	19.4	3.0
Si	700	20000	28.6	3.4
Ge	500	15500	31.0	3.6
SiC	2700	50000	18.5	2.9
C(ダイヤモンド)	8000	143000	17.9	2.8
フェノールレジジン	50	370	7.4	1.6

図5 領域(III)における、転位操作によるクラックの生成破壊過程のモデル

めたデータによると、共有結晶では $G/H \approx 10$ 、金属では $E/H \approx 500$ となる。前者では $E = 2.5 G$ とすれば $c/a = 3$ であり、圧こん径の2倍の幅の塑性部が生じる。後者では、 c/a が10にも達する。いろいろな物質についてすでに求められている値を使って E/H を計算し、また(8)式によって c/a を求めて表1に示したが、金属では塑性部の拡がり非常に大きく、共有結晶では小さいことが理解されるであろう。 c/a が小さいと加工変質層は生じにくくなる。また塑性変形による表面形状の変化も少なくなり、仕上げ面創成過程におけるじょう乱が少なくなることを意味し、仕上げやすい傾向を示すと思われる。

3.4 領域(III)における破壊の発生

通常の巨視的破壊においては、ぜい性物質と呼ばれるものでは先在するクラックが核となる。金属などの延性、あるいは半ぜい性物質にのみ、先駆する変形によるクラック生成の機構が認められる。しかし領域(III)では、破壊に先在クラックは関与しない。また前々項で述べたように、球押込みの応力状態では、理想強度に達してへき開する機構はありえない。(せん断応力の小さい逆静水圧的な応力状態では理想的なへき開が起こる。クラック先端はそれに近い)。したがってここでは、変形、クラックの発生、その伝播(破壊)とたどるプロセスが重要となる。

球の押込みで拡がる塑性域がどのようなクラックを生じるかが問題である。ここではもっとも簡単に塑性域に図5のようなクラックが生じうと考える。弾塑性境界上には、引張応力 $\sigma_\theta = Y/3$ 、圧縮応力 $\sigma_r = -2Y/3$ が生じている。したがって図のようなクラックが破壊源になりやすい。塑性域では変形による転位密度の増大のために有効表面エネルギーは低下し、また変形の不均一性によってクラックができやすい。図のようなクラックを想定することは無理がないと思われる。

図5のようなクラックが、引張応力 $\sigma_\theta = Y/3$ によ

て破壊する条件を求める。Griffith の条件は、

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{E\gamma}{l}} \quad (9)$$

$2l$: クラック長さ。ここで Gilman²⁾ の与えた表面エネルギーの関係、

$$\gamma = \frac{E}{y} \left(\frac{r_a}{\pi} \right)^2 \quad (10)$$

y : へき開面間の距離、 r_a : 原子面間で力のおよぶ距離。この式を使って(9)式から γ を消去する。ここで y と r_a の関係は結晶によって異なるので $r_a/y = \alpha (\geq 1)$ とおき、

$$\sigma_f = \frac{\alpha E}{\pi} \sqrt{\frac{y}{l}} \quad (11)$$

とし、 $2l = c - a$ なるクラックを考えるのであるから、

$$\sigma_f = \frac{\alpha E}{\pi} \sqrt{\frac{2y}{c-a}} \quad (12)$$

となる。 c/a は結晶の特性として定められるから、荷重 P が増して a が増し、その結果 $c-a$ が大きくなって Griffith 条件が満たされる点がぜい性破壊の点である。すなわち、

$$\frac{Y}{3} = \frac{\alpha E}{\pi} \sqrt{\frac{2y}{c-a}} \quad (13)$$

これから

$$a = \frac{18 \alpha^2 y}{\left(\frac{c}{a} - 1 \right)^2 \pi^2} \left(\frac{E}{Y} \right)^2 \quad (14)$$

となる。ところで、 $c/a = \{E/3(1-\nu)Y\}^{1/3}$ であるから破壊のはじまる a の値 a_c は、(14)式から E/Y を消去して、

$$a_c = \frac{162(1-\nu)^2 \alpha^2}{\pi^2} \frac{\left(\frac{c}{a} \right)}{\left(\frac{c}{a} - 1 \right)^2} y \quad (15)$$

となる。 c/a が材料固有であるから $a_c/\alpha^2 y$ が材料固有となることがわかる。 y はへき開面間の格子間距離であ

図6 クラックが成長する限界キャビティ径 a_c とへき開面間格子間距離 y との比 $a_c/(\alpha^2 y)$ の、結晶のヤング率 E と硬度 H との比 E/H による変化。 $\alpha = 0.25$ 。

る。(8) 式と (5) 式とを使って $a_c/\alpha^2 y$ と E/H との関係を図示すると図 6 をうる。この図によると、ともに共有結晶では、 $a_c/y=1000\sim 2000$ となり、格子間隔の 1000 倍でいどではやくもへき開破壊の可能性がある。 $y=5\text{\AA}$ とすると、 $a_c=0.5\mu$ であって、圧こん径が μ ていどでクラックが生長する。このことは転位なし(領域(II))のところへ球を押込むとき前々項で述べたように塑性変形の前駆なしに理想強度に達するへき開は決して起こさないが、転位が創られて塑性変形域が拡がり、クラックが生成、生長してぜい性的に挙動する機構はありうることを示している。

ところでこのような微視的なクラックが大きなクラックにまで生長し、さらに破片を生じるなどして加工に寄与するかどうかは別の問題である。ある大きさのクラックを生じるためには、そのクラック面の表面エネルギーと見合った弾性エネルギーが周辺にたくわえられていなければならない。このクラックの成長は、球押し込みでは応力こう配が急であることからかなりわずかの範囲にしかおよばないと考えられる。 α の増大、したがって c の増大によって、クラック周辺の弾性エネルギーは必要な表面エネルギー以上に増大するから、 α の増大によって安定クラックが成長し、その長さはおそらく c^2 に比例するのではないかと思われる。この定量的検討は後報にゆずる。実際の加工で、荷重が衝撃的に加わるような場合には、荷重持続時間が短く、できたクラックが除荷後に閉じて Dislocation crack を残すこともありうる。

3.5 領域(IV)——転位ありクラックあり

この領域は、切削や研削などのかなりマクロな加工単位に相当するものである。クラックが破壊に関与する均一応力場に十分多く存在するようになると、これは通常の材料試験における延性ぜい性挙動の問題と同じになるわけである。もちろんここでも加工による応力状態の差異が材料の挙動の決定に重要な影響をおよぼすことは当然である。一般的に知られるように引張応力の大きくなる加工ではぜい性的傾向が強くなり、圧縮では塑性的となる。一例として引張試験で完全ぜい性を示す材料を単軸圧縮応力によって圧縮したとき、ぜい性破壊するか延性的に変形するかは、先在クラック(圧縮応力と 30° 傾斜)が引張応力の 8 倍の圧縮応力で作動してぜい性破壊するか、あるいはそれ以前に 45° の面上の最大せん断応力で変形するかの問題として近似的に考えてよく、これは巨視的引張破壊強度(ぜい性) σ_f と、微小硬度 H_V とから求めうる。簡単な計算によると⁸⁾

$$12 \frac{\sigma_f}{H_V}$$

の値が 1 より大きければ延性、1 より小さければぜい性と判定される。

球押し込みのような応力状態では、3.2 項で述べたような弾性接触状態において塑性変形の前駆なしにクラック成長が起こることは、先在クラックによって十分ありうる。したがって結晶固有の性質としては論じることができず、クラックの分布状態が重要な因子である。

先在クラックそのものの問題は、クラック先端でへき開が進行するか、塑性変形によって先端が Rounding を起こして応力緩和が起こりへき開の進行が止まるかの問題である。クラック先端が結晶の凝集力に相当する状態になっているとき、せん断応力は、

$$\tau = \frac{G}{5} \left(\frac{y}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \sin \theta \cos \theta$$

となる。 r は先端からの距離、 θ はクラック面となす角である。結晶によってへき開面とすべり面の関係は一義的にきまってくるから、上式の τ は r の関数としてきまり、変形の可能性を検討できる。結晶によっては、すべり抵抗の粘性成分が大きいものがある。このような物質では、加工で荷重速度が変わると、延性ぜい性挙動が変わることになる。

4. 温度依存

前節で分類した各領域において、それぞれ温度依存は異なった機構をもつ。

領域(I)では熱過程の機構と類似であり、その観点から検討されるべきであるが今後の問題である。

領域(II)では剛性率とヤング率の温度依存である。両者は本質的に同じで、延性ぜい性挙動という観点からは温度の影響はないと言ってよい。

領域(III)では、ヤング率 E と、転位の動きやすさ、あるいは硬度 H との温度依存の関係である。一般に弾性定数の昇温による低下はわずかである。それにたいして塑性変形抵抗の昇温による低下はいちじるしい。実験的諸事実によれば、これは共有結晶でもっともいじるしく、金属では少ない。とくに強調すべきことは、多くの共有結晶では昇温によって転位はいちじるしく動きやすくなり、ある温度で E/H は金属と同様の値になってくる。たとえば、Si では 600°C 、Ge では 400°C 、ダイヤモンドでは 1800°C 、SiC では 1000°C である。したがってそれらの温度以上では金属と同様の挙動を示すことが考えられ、加工も同様に行なえると思われる。もちろん実用金属ではその挙動が不純物によって支配されるように、共有結晶でも高温では不純物の効果が大きくなることは考慮しなければならない。

一方金属では、逆に温度を低下させることによって、 E/H を共有結晶程度にまで下げることは不可能である。金属結晶では、低温でも転位のポテンシャル障壁は低く転位は動きうる。したがって塑性変形領域 c/a を小さくしえないのである。

5. あとがき

加工によって形を作る過程は、原理的に言えば物質の原子の再配列の問題である。したがって物質の加工において示す挙動を原子あるいは格子欠陥のレベルで十分理解しておくことは、加工を正しく行なうために必要なことである。本報ではそのような観点から、とくに加工寸法とぜい性延性挙動との関連をとり上げ、それを統一的に理解する試論を提起したものである。加工一般に適用するためには、第一にいろいろな加工において、物質の加工点近傍の応力分布に関する知識が必要で、その観点からの加工法の分類を行なっていくことが望ましい。

本論で用いた弾塑性論は、いろいろな加工の問題を解くのに有力であると考えられる。最近多く研究されている、工具の切込みはじめの問題、また砥粒加工における

より上がりなどは弾塑性論の解として与えられると考えられる。また切削加工における工具面上接触長さの問題も同じく解けるのではないだろうか。本報で用いた Hill の解は、等方体、加工硬化なし、無限遠体などの理想化されたもので、定量的な解としては問題が残されている。おそらく前述の問題も、また本報で取扱った問題も、厳密な解を求めることは困難であると思われるが、数値解を求めることは今後の問題として興味があるであろう。

本研究は筆者が理化学研究所に在職中に行なったものであり、谷口紀男主任研究員の貴重な御討論に負うところが多い。ここに感謝する。

文 献

- 1) R. Hill: The Mathematical Theory of Plasticity Oxford, 1950.
- 2) J.J. Gilman: The Strength of Ceramic Crystals, Physics and Chemistry of Ceramics, Cyrus Klingsberg(ed.), Gordon and Beach, (1962) 240.
- 3) 吉川弘之: 砥粒の機械的性質と切れ刃形成, 精密機械 31, 11(1965) 907.

情 報

(53 頁よりつづく)

香族系ポリマーの合成研究 (東大工, 岩倉義男) 220 ▽
国体乾燥機構の総合的研究 (京大工, 桐栄良三) 150

工作機械の受注好調

工作機械の受注がいぜん好調にふえ続けている。日本工作機械工業会 (会長, 河原亮三郎) の調べによるとことし 1~6 月 (一部推定) の受注実績は 968 億 1,800 万円で、昨年同期にくらべ 44.4% の大幅増加となった。このように受注が好調なのは各産業界が積極的に合理化ならびに省力化投資を行なっているからでこの調子で受注が続けばことしの受注総額は昨年を下回るという当初の予想とは逆に、史上最高だった昨年実績を大幅に上回り、年間受注実績としてはじめて 2,000 億円の大台にのせるものと期待される。同工業会によると 1~6 月の月間受注実績は 1 月 146 億 8,100 万円、2 月 159 億 4,900 万円、3 月 177 億 6,400 万円、4 月 156 億 1,500 万円、

5 月 168 億 900 万円、6 月 160 億円 (一部推定) という状況で、この間の月間平均受注は 161 億 3,600 万円である。昨年 1~12 月の月間平均受注 131 億円にくらべると 22% 強の増加であり、受注の基調が、昨年より引続いて上昇していることを示している。1~6 月の受注実績だけを比較すると、ことしは昨年にくらべ 44.4% もふえており、とくに 3 月は月間受注実績としてはこれまでの最高だった昨年 11 月の 161 億 3,000 万円を 16 億 3,400 万円も上回り、月間受注実績の記録を更新した。このように受注がふえ続けているのは、各産業界が資本自由化を目前に控えて国際競争力強化のため、合理化投資を積極的に行なっていることと、人手不足に対処して NC (数値制御) 工作機械や効率のよい自動機械の導入を推進しているためであり、こんご相当期間この傾向が続くとみられる。
(服部敏夫)