

マイクロオーダーからナノへの超精密化 加工技術と問題点

広橋光治*

1. はじめに

科学技術が発展し、塑性加工分野においても昨今はマイクロ (10^{-6} m)オーダーからナノ (10^{-9} m)オーダーの超高度な寸法精度や表面性状が要求される時代が到来し、我々材料屋や加工屋もこれに悩ませながらも対応すべくナノテクノロジー(?)の技術を構築させるように努力している所である。そこでその技術を体系化するために“何ら問題点や課題は無いのか?”少しでも明らかにすることが本命題と考える。なお、今回の加工対象材料は金属に限定する。

2. 一般的概念

本来加工品の精度とか表面性状等は対象物の“大きさ”により異なるはずで、重厚長大なモノにマイクロやナノオーダーの精度を要求しても無意味であると考

える。したがって、超精密化加工技術は限りなく軽薄短小な部材に対しての目標とする加工技術である。

表1は、材料の加工精度と関連技術に関して概念的にまとめたもので、新素材の開発や超高精度な加工機械の導入によって時代とともに進歩し、今やナノオーダーの時代を迎えた(?)と言われている。果たして従来の加工屋、材料屋及び設計屋が三位一体となった総合技術で達成できるのであろうか。否、私の考えではその間に物理屋の助けをどうしても必要と考える。すなわち、金属材料を加工対象と考えれば、それを構成する金属原子直径は0.2~0.4nmであり、数個の原子集団で1 nmオーダーになる。したがって一般的には、塑性変形すなわち後述するように転位を伴った加工をする場合には数nmオーダーが加工寸法・表面性状の限界と考える。実際に超LSIの製造では10nmオーダーの精度や数nmオーダーの表面あらかさが要求されたり、レーザー光集光用ミラーやレンズの精度は波長λの数分

表1 加工精度と関連加工技術

オーダー	材料 (上段) 工具 (下段)	加工技術	測定機器と要素	表面観察と分析
10 μm (10^3 m)	一般金属の結晶粒径 超硬合金 工具鋼	塑性加工 機械 (切削) 加工 電気加工 (放電, 電解等) 一般接合	ダイヤルゲージ マイクロメーター 空気マイクロ 光学偏向レンズ	光学顕微鏡 目視
1 μm (10^4 m)	超塑性材料 金属酸化物 砥粒 多結晶ダイヤモンド	精密塑性加工 研削加工 超精密加工 電子ビーム加工 レーザー光加工	差動トランス ストレインゲージ 光・磁気・モアレ縞 ビジコン CCD	走査型電子顕微鏡 (SEM) 触針式表面粗さ計
0.01 μm (10^5 m)	? 反応性砥粒 ラップ板 イオン レーザー フォトリジスト	メカノケミカルラッピング レーザーあるいは電子ビーム 露光	超精密差動トランス レーザードップラー干渉 電磁・光・センサ	電子回折 X線マイクロアナライザー (EPMA) レーザー顕微鏡
0.001 μm (10^6 m =1nm)	原子, 分子, イオン ?	非接触ラッピングイオン加工 (イオンプレATING, スパ ッターリング, エッチング)	電子線, X線 イオン (STEM, IMA)	イオン分析 オージェ分析
0.1nm =Sub-nano meter	原子, 分子, 中性子 ?	原子・分子分離合成加工	?	? シミュレーション

の一ないし十分の一の表面あらさや形状精度が要求されている状況下において果たして満足していく製品が安定して供給されているのだろうか？

3. マクロからミクロへの変形

加工精度を高めるためには工具と被加工物間の相対運動の精度を高め、正しい(?)運動をさせれば良い⁽¹⁾。しかし、加工に伴って相方が発熱したり、環境の温度変化によって熱変形が起こり、誤差が発生する。昨今

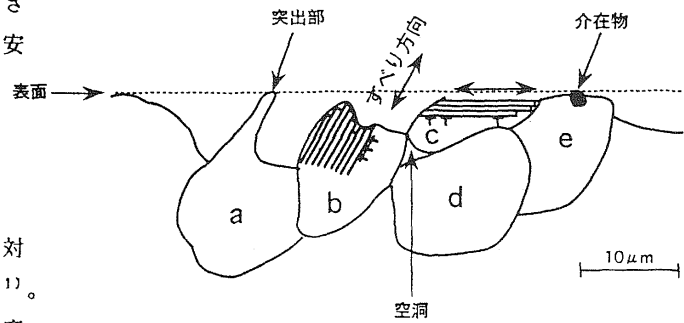


図1 加工部断面の模式図

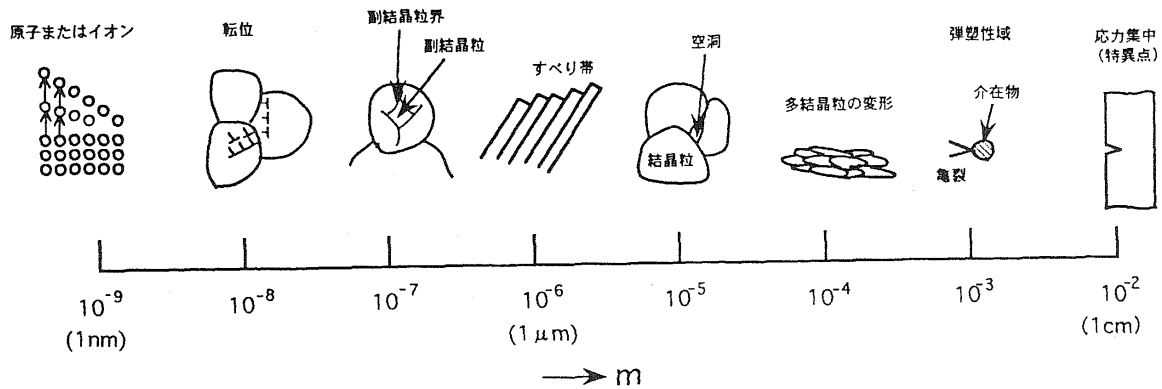


図2 マクロからミクロへの変形時の考慮すべき概念

は良いセンサと測定器具の導入によってこれら環境変化はフィードバックをかけて制御され、精度は著しく向上している。

一方、被加工材側から見ると図1に示す通り、多結晶材料(非晶出材を除く)の加工部断面は種々の欠陥を有している。すなわち、一見平坦に見える表面も突出部や窪みあるいは空孔、介在物等の突出あるいはその離脱後の穴等マクロ的光顕オーダーの凹凸、さらには結晶すべりや転位、原子空孔などミクロ的電顕オーダーの微細な凹凸が多少の差はあっても必ず存在する。

図2はこれら欠陥を概念的に判り易い様に大きさを整理したもので、肉眼でも観察可能な 10^{-2}m (= 1 cm) オーダーの欠陥からナノオーダー (10^{-9}m = 1 nm) 以下の原子の分離加工領域まで実際に制御しながら塑性加工あるいは機械加工している訳である。果たしてナノオーダーの加工が偶然ではなく、意図的に実施される時代が来るのか？ 私の個人的意見から述べるとDNA遺伝子組替えと同じようにすでに到達しているのでは(?)と考える。ただし、次節で示す様にかなり無理をした加工であるのでアフターケアを誤ると元へ戻るのでは注意を要する。

4. 加工後の課題

私は普通の講義中に学生に対して、金属というのは人間(君達)と全く同じ様に“怠け者であり、浮気者で横着者である”という話をして嫌われているのだが、この概念は少し誇張してはいるが決して誤りではないとおもう。すなわち、材料内部は内部エネルギーが最低になる様最も変形し易い所でし易い様に変形し、変形後は少しでもエネルギーが低くなる様に努力(?)している。

4.1 結晶学的オーダーでの課題

図3は変形後の再結晶や回復に伴う変化を模式的に示したものである。同図(a)は冷間圧延板を例に示したもので、仮に圧延状態で寸法も表面性状も良かったものとして、扁平化している結晶粒界は同図(b)に示す粒界三重重点模式図と式(1)の関係から最少界面エネルギーで平衡が保たれる様に正六角形に近い丸味を帯びた粒に再結晶する。

$$\frac{\gamma_{23}}{\sin \theta_1} = \frac{\gamma_{13}}{\sin \theta_2} = \frac{\gamma_{12}}{\sin \theta_3} \quad (1)$$

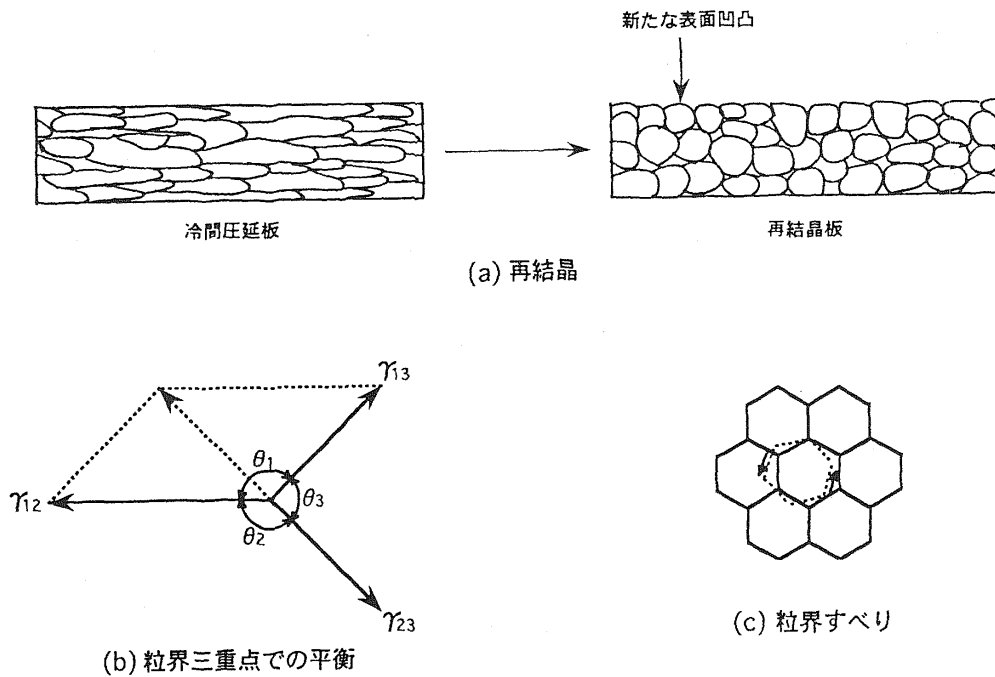


図3 結晶学的変化に伴って予想される形状、寸法変化

ここで、 γ は液体の界面張力に相当する粒界の張力で θ は粒界三重点でのそれぞれの結晶粒の扁平度を表わす角度で、 $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 120^\circ$ になれば界面張力は最少値となって平衡になる。すなわち、圧延後の再結晶によって正六角形に近い丸い結晶粒に生まれ変わるが、同時に図3(a)に示す様に表面に新たな凹凸が現れたり、材料によっては板厚方向が膨張し、圧延方向に収縮したりする。この様な現象は、図1に示した欠陥の多い表面は特に活発に起こり（活性化）、丹精込めて加工した超精度が一部浮気者の原子が酸化、あるいは原子空孔や転位が動いたりして表面性状は変化する場合がある。一例として、鏡面仕上げでもすぐに曇ってしまう金属表面などで経験するところであるが、これも力学的には残留応力によるもので、部材によっては一時的に防護策を講じても経年変化として現れるので注意する必要がある。

一般の金属・合金でも粒径を数 μm に微細化すれば超塑性が発現し、特定条件化で延性が著しく大きくなる⁽²⁾ことは良く知られている。その主たる変形機構は、図3(c)に示す粒界すべりで、これが大変形に大きく寄与している。一方でその粒界すべりが局部的に不安定な状態で終了している場合には加工後の熱処理や経年変化によって寸法変化が現れる場合もある。

なお、超塑性に関しては従来最適加工（ひずみ）速度が $(10^{-3} \sim 10^{-4}) \text{ s}^{-1}$ と遅いことが実用上欠点の一つにされていたが、近年結晶粒径をMA（メカニカルアロイイング→機械的合金化）処理するなどしてサブ

ミクロン粒径まで超微細化するか、超微細化粒子を分散させるなどして最適ひずみ速度を $(10^2 \sim 10^3) \text{ s}^{-1}$ まで上昇させた報告⁽⁴⁾も多数ある。

また結晶粒径の微細化はナノ結晶、さらにはアモルファスへとつながるものと考えているが、アモルファス材料の加工となると全く異なった次元になるので本論からは除外した。

4.2 原子オーダーでの課題

図4は原子の拡散状態を示したもので、同図(a)は原子aの点欠陥としての空孔への拡散、あるいは格子間原子bの拡散移動を模式的に示したものである。また同図(b)は面心立方格子の面心原子が空孔へ拡散移動する場合の活性化エネルギー q の変化を示したもので、原子が移動するためには q のレベルを越えなければならないことを示している。ただし、 q の山を途中まで上りかけた状態にある原子（例えば、加工後の状態）は図中の黒塗り原子の最も活性度の低い位置に戻ろうとする。したがって、塑性加工によって多数の転位が導入されたり、点欠陥が多く存在する場合には焼なまし等の再結晶時は当然、経年変化でも現れることが予想される。

なお、加熱・冷却サイクルで相変態（マルテンサイト）を伴った形状記憶あるいは形状回復合金に関する議論はここでは割愛する。

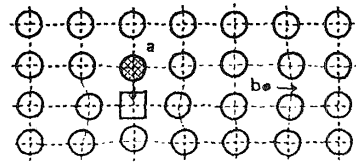
5. まとめ

以上、主に一般金属材料を対象とし、加工表面に加工変質層を伴う場合についての課題と問題点を列記するに留めたが、無歪加工、例えば複合電解加工など以外の加工方法で凹凸がナノオーダーと極めて表面性状の良い表面は、アモルファス状態でしか達成できない(?)のではとも考えられる。

おわりに、本稿をまとめるにあたって有益な助言を賜った都立大学・長岡技術科学大学名誉教授宮川松男先生に謝意を表します。

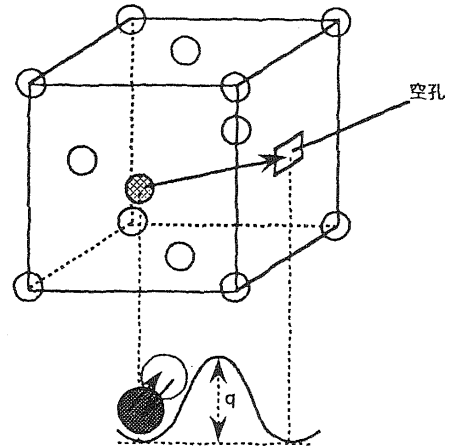
(参考文献)

- (1) 超精密加工技術：砥粒加工研究会熊谷記念会編，工業調査会出版，1985.
- (2) 超塑性と金属加工技術：超塑性研究会編，日刊工業新聞社出版，1980.
- (3) 広橋光治他：塑性と加工，28巻 323号(1987)，1252.
- (4) 例えば，東 健司：機械の研究，44巻 7号(1992)，724.
- (5) 日本金属学会報：“形状記憶合金とその応用”特集号，24巻 1号(1985).



- a原子の空孔拡散
- 格子間原子bの移動

(a)点欠陥の拡散



(b) fcc金属の拡散

図4 原子の拡散