

超精密切削加工の精度限界

— nmレベルの加工は可能か? —



島田 尚一*

1. はじめに

切削加工とは鋭く硬い工具を使って、図1、図2に示すように、工作物（一般に金属）の表面を削り取って希望する形に仕上げる加工法であり、機器要素の仕上げ法として最も広く用いられる。工具を包丁、工作物を大根と考えれば、ちょうど寿司屋などでよく見られる、刺身のつまを作るための桂剥きと原理は全く同じである。従来の切削によって加工された部品の精度はたかだか数 $10\mu\text{m}$ であり、いわゆる精密部品の最終仕上の手段としてはあまり一般的ではなかった。しかし、ここ20年余りの間に、高精度工作機械と単結晶ダイヤモンド工具を用いる超精密切削加工技術の開発が急速に進み、今や先端産業におけるキー・テクノロジーともいえる位置を占めるにいたっている。例えば、磁気ディスク、

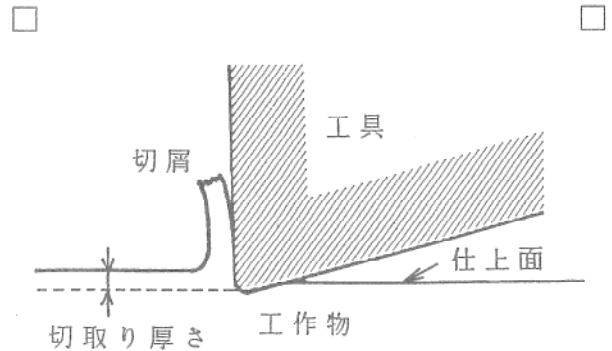


図2 切削加工の2次元モデル

ポリゴン鏡、レーザ光用金属鏡などの仕上げ加工では既に実用期に入っており、さらに、非球面プラスチックレンズの金型や結晶材料を用いた赤外光用光学部品などのように、従来はラッピングやポリシングなどのいわゆる研磨加工が行われていたものにその適用範囲を広げつつある。また、加工精度は従来の切削加工に比べて2桁高く、形状精度が加工長さ 10mm 当り数 10nm 表面粗さが数 nm から数 10nm の滑らかな面が得られる。では超精密切削による加工精度はどこまで高めることができるのであろうか？ 残念ながらその答は今のところまだ得られてはいない。ここでは、どこまで薄く工作物表面を削り取り得るかという観点から、そのひとつの精度限界を探る試みについて述べる。

2. 加工精度を支配する要因¹⁾

超精密切削の基本原理は、図3に示すように、極めて高い精度を持つ工作機械の運動を、極めて良い切れ味と滑らかな輪郭を持つ工具を用いて、極めて被削性の良い工作物上に、工具輪郭の繰り返しとして転写することである。したがって、本質的に、加工精度は創成される表面形状の直接の原型となる工作機械の運動精度と工具切刃輪郭の仕上面への転写性に支配される。

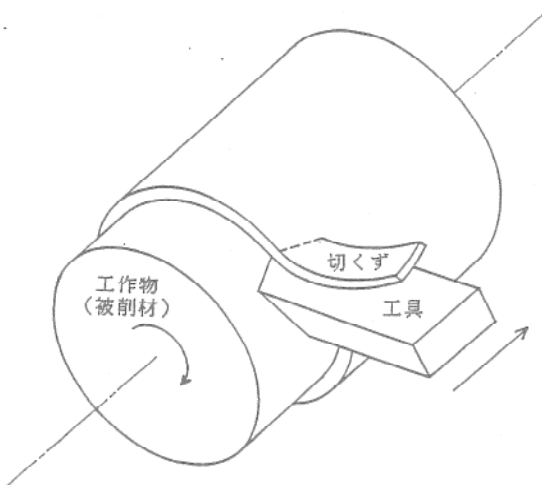


図1 切削加工の一例

*島田尚一 (Shoichi SHIMADA), 大阪大学工学部, 精密工学科, 講師, 工学博士, 精密加工学

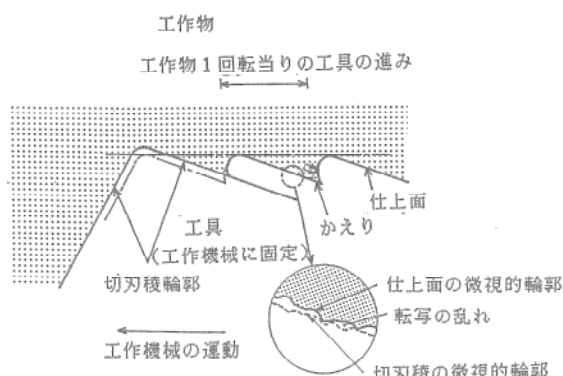


図3 工具切刃稜輪郭の転写による切削仕上面の形成モデル

回転運動をする主轴や直進運動をするスライドテーブルなどの工作機械要素の運動精度は、運動再現性が極めて高い静圧支持方式の開発と最近の進んだ計測・制御技術の支援を得て、現在10nmから100nmに達し、実験機では1nmレベルの精度も問題にされている。一方、単結晶ダイヤモンド工具切刃は、そう大きな有効長さを必要としなければ、1nm程度の滑らかさに仕上げることは困難ではないし、化学的に安定な物質であるため、一部の材料を除けば、被削材との相互作用がほとんどなく、極めて高い切刃輪郭の転写性を示す。

さて、このような工具を着けた工作機械が理想的に働いているとしても、実は、工具切刃が実際に工作物を削り取る厚さ（有効切取り厚さ）は、図4に示すように、工具刃先で測定される公称切取り厚さとは必ずしも一致しないし、通常ある変動幅を持つ。公称切取り厚さを小さく

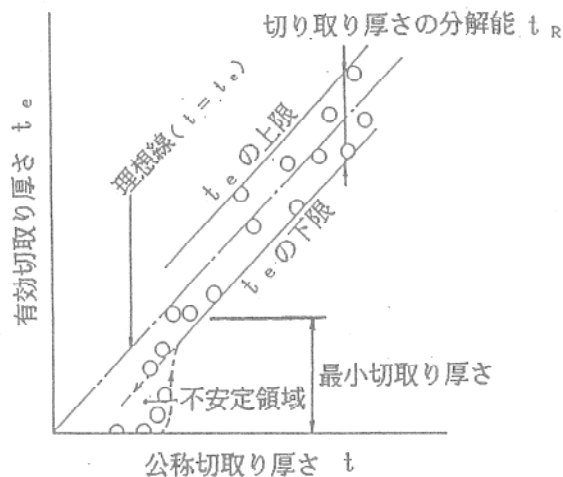


図4 切取り厚さにおける諸概念

して行くと、有効切取り厚さも小さくなるが、ある程度以上に小さくなると、その変動のため、切くずの排出が不安定になり、正常な切削が行われなくなる。この安定した切くずを排出できる限界の切取り厚さを最小切取り厚さと呼ぶ。最小切取り厚さは切取り厚さの分解能、すなわち切削加工における幾何学的加工精度の制御限界を決定する²⁾

3. 最小切取り厚さの限界

工具の側から見ると、切刃稜が鋭利でその一様性が高いほど最小切取り厚さは小さくなるのが実験的にも確かめられている。したがって、工具切刃をどこまで鋭くできるかが最小切取り厚さ、ひいては切削加工精度の到達限界を決定するひとつの鍵となる。鋭さの尺度である切刃稜丸味半径は、ダイヤモンドにおいては2nm程度があるひとつの物理的な限界であるという試算がある²⁾が、このレベルでは信頼できる測定法がないためダイヤモンド工具の切刃稜がどの程度鋭利であるかは今のところ明らかではない。

そこで微小切削実験³⁾を通してダイヤモンド工具の最小切取り厚さを実測することを試みた。切削実験には、おそらくは現在の最高の精度レベルにあると考えられる、米国ローレンスリバモア国立研究所の精密切削実験機を、また被削材には、同研究所で調整された、均一で微細な組織を持つ電気メッキ銅を用いた。工具は、筆者らの開発した、物理的な測定手段によって選別した、欠陥の少ない原石を極めて注意深く研磨仕上げしたもので、SEMなどの現在使い得る観察手段では、チップング(欠け)などの異常が見られないものを使用した。公称切取り厚さを変化させて切削を行い、排出された切くずをSEMで観察した。図5は公称切取り厚さが1nmの時の切くずを示す。約12 μ mの有効切刃長さ(切削に関与している切刃の長さ)全域にわたって正常な切削が行われ、均一な厚さの切くずが排出されていることがわかる。1nmといえば髪の毛の5万分の1から10万分の1の厚さであり、その1万倍余りの幅で金属表面が削り取られていることになる。また、金属原子の大きさを考える

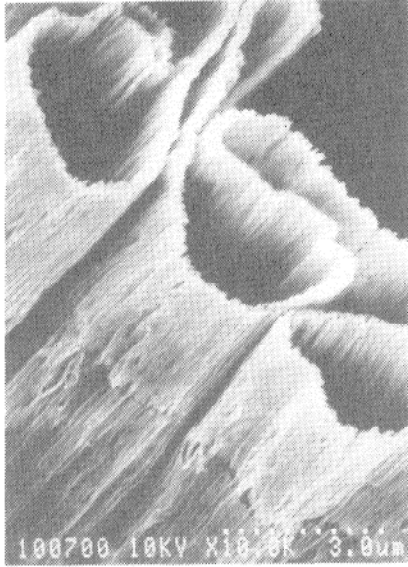


図5 公称切取り厚さが1nmの切くず

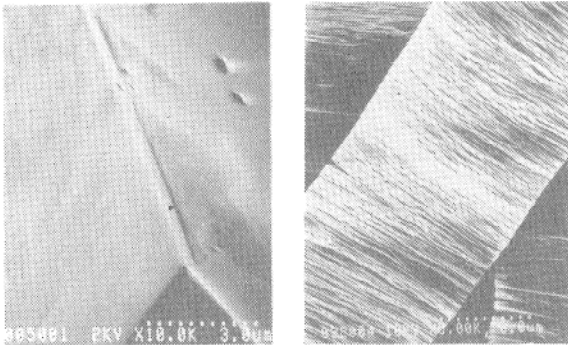


図6 切削後の工具切刃稜(左)と工具と接触した側の切くずの表面(右)

と、1nmはわずか10個分以下にしか相当しないため、切くずの分離が、マクロな切削と同様の先在する転位の移動による変形破壊機構にもとづいているとは考えにくく、このような切削現象の解明には微小切削理論とでも呼ぶべき新し

いアプローチが必要であろう。また、図6に示す、切削後の工具切刃稜には切くずの接触した部分に摩耗痕が見られる。切刃稜にある小さな突起はダイヤモンド原石中に先在した硬い部分が現われたものであるが、ちょうどこの位置に対応して切くず裏面に連続した傷が見られる。このことはダイヤモンド工具の輪郭転写性が極めて高いことを示している。

4. おわりに

極めて高い精度を持つ工作機械と高性能工具を用いるとnmレベルの切取り厚さで切削が可能であることが明らかになった。しかし、工具の損耗、工作機械や工作物の熱変形などの時間的な変動要因の存在およびnmレベルでの計測技術が簡単に活用できないという現状を考えると、超精密切削加工の実用的な精度限界は10nm程度であろう。さらに、この精度レベルでの安定した切削加工技術を実用化するには、nmレベルでの寸法、運動、表面などの計測技術、物性評価技術、均質で安定な被削材料と熱処理法の開発などの不可欠な基盤技術の確立が望まれ、多くの基礎的学問分野、学際的分野の協力の必要性が痛感される。

参 考 文 献

- 1) 井川, 島田, 精密工学会誌, 52, 12 (1986) 2000.
- 2) N. Ikawa and S. Shimada, Proc. 3rd ICPE (1977) 357.
- 3) 井川他, 昭和62年度精密工学会春期大会学術講演会論文集 (1987) 465.