

〈12 回連載 ショートレクチャー〉

若手技術者のための研削工学

(第 1 回) 研削加工の位置付けと特徴

奥山繁樹 (防衛大名誉教授)

1. 本連載記事執筆のねらい

筆者は、工作機械工業会が提供している若手技術者・研究者の教育セミナーや本会のグラインディング・アカデミーに講師として招かれ、研削工学の基礎を教育する機会を得ている。受講者の中には機械系の学卒者があり、機械工作法の概要を学んでいるものの、研削工学を理解している者は少ない。結果、概論の部分では興味を持てても、研削理論に入ると拒否反応が先に立つようで「切削工学」よりも理解しづらいとの感想が多い。これは、砥粒加工をメインターゲットとしている本会にとって看過できない事態である。そこで「若手技術者のための研削工学」を、通年で執筆させていただくことにした次第である。

記事のねらいは、研削工学関係の教科書を読み解け、かつ会誌に掲載されている解説記事や論文の意味を理解できる素地を身に付けていただくにある。このため、先端技術や技能的なノウハウについては他の記事にゆだね、「研削工学」をわかりやすく解説することに意を尽くしたい。また、この記事を一冊分まとめていただければ、簡単な研削工学の教科書として長く利用できるようにしたいと思っている。

また、記事の内容は筆者らがコロナ社から出版した教科書「機械加工学の基礎」¹⁾をわかりやすくしたものであるのもので、さらに深い学習を希望する読者には、本書を参考にしていただきたい。

なおこの記事では、多くの文献や参考書などから引



正会員 防衛大学校名誉教授
略歴: 1970 防衛大卒業, 1981 博士(工学), 1994 防衛大教授,
2009~2010 砥粒加工学会会長。
専門分野: 砥粒加工, 精密加工,
精密計測, 工作機械。
現在, 砥粒加工学会顧問。

用させていただいているが、煩雑さを避けるため、とくに参照が必要なものを除き、引用の事実を記すのを省かせて頂くことをご容赦願いたい。

2. 砥粒加工の歴史と位置付け

2.1 砥粒加工の歴史

研削工学を学んでいただくのに先だって、砥粒加工の歴史と機械加工の中に占める砥粒加工の位置付けについて簡単に説明したい。

図 1 は、メソポタミアで発見された古代の剣であり、これに刃付けするには、砥石による研磨が不可欠である。このように、研磨技術の歴史は非常に古い。中世になると加工能率を高めるため、図 2 に示すように自然石を円盤状に加工して、これを回転させる研磨機が使用されるようになったものの、その後の研削・研磨装置と加工技術の発達は、遅々としたものであった。

1800 年代に入ると砂やエメリーを金属円盤などに埋め込んだ砥石車を使った簡単な加工装置が製作されている。1825 年には、純度の高いアルミナ(Al_2O_3)がイ



図 1 紀元前約 3500 年の青銅の剣 (メソポタミア)

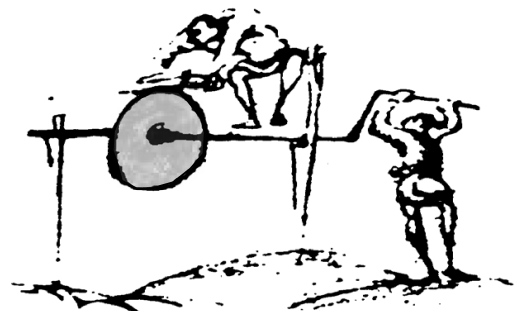


図 2 自然石を用いた研磨機

なお、一般に強制切込み加工は加工形状を制御しやすく、加工能率も高いが仕上げ面粗さや表面損傷が大きくなりやすいことから、主に加工能率を重視する場合に適用される。

一方、圧力切込み加工は砥石や遊離砥粒に圧力をかけて工作物に押し込み、その表面を極微量ずつ除去するものである。加工速度は、工作物と砥石（あるいは砥粒の付着したポリッシャなど）との相対移動距離と圧力によって支配される。このとき、圧力の高い所は優先的に除去されるから、加工面形状の修正も可能である。しかし、研磨ベルトや研磨布紙を用いる場合には、形状の修正能力は低い。一方、圧力を小さくすれば切れ刃あたりの切込みは極めて小さくなり、光沢のある鏡面を容易に創成できる。このため、圧力切込み加工は主に仕上げ面の粗さや品質を重視する場合に適用される。

一方、熟練した技能者が圧力切込み加工を行えば、運動転写で作製した部品の形状精度をさらに高めることができる。つまり、母性原理を離れてさらなる高精度化をはかることができるのである。

3. 研削加工の特徴

図7は、砥石表面の顕微鏡写真である。砥粒がボンド材（この場合、ビトリファイド）によって疎に結合されて砥石を形成していることはわかるが、切れ刃がどこにあるのかわからない。また、図8は東北大学の厨川先生を通じて入手した砥石表面の立体顕微鏡写真（立体感が強調されている）である。立体視の方法は次のとおりである：二つの写真の真ん中に顔を近づけ、遠方を見ると3つの写真が見えてくる。中央の写真に少しずつ目の焦点を合わせると、破線で囲んだ部分が盛り上がっているのがわかる。この部分が砥粒の先端である。しかしこれを見ても、サブミクロンの除去作用を行う切れ刃がどこなのか、どう作用するのかかわからない。

いずれにしても、砥粒はボンド材によって弾性的に保持されており、しかも切れ刃が鋭利とは限らないから、砥粒が工作物と接触した当初は図9(a)に示すように両

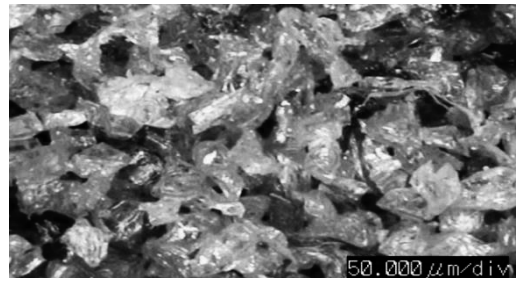


図7 砥石(GC120H)表面の光学顕微鏡写真

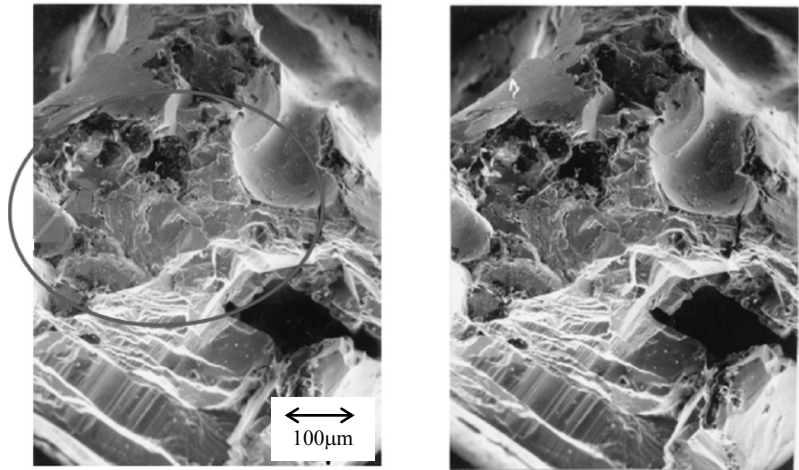


図8 精密ドレッシング直後のWA砥粒の先端部(丸で囲んだ部分)

者は弾性的に上滑りするだけで、擦過痕は残らない。さらに工作物との干渉深さが増加する（圧力が増すと(b)工作物を掘り起こす（塑性上滑りする）ようになり、干渉深さがさらに大きくなると(c)切りくずを排出すると考えられる。

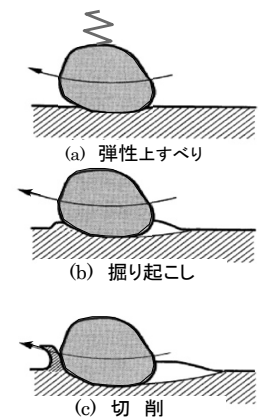


図9 砥粒と工作物の接触模型

したがって、工作物をわずかに傾けて砥粒を作用させると、図10に示すような擦過痕ができる。図のE~Pの範囲が弾性接触域、P~Cの範囲が塑性接触域、C点より手前が切削域である。研削砥石は全体として、工作物表面をこのように擦過しながら除去するから、余分なエネルギーを消耗するとともに、加工面表層を塑性流動させる。

図11は、フライス加工と研削加工における工作物の除去機構をモデル化したものである。図から、工具と工

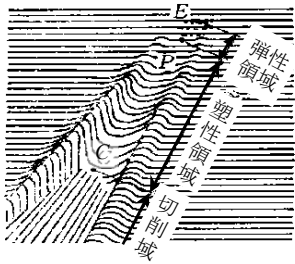
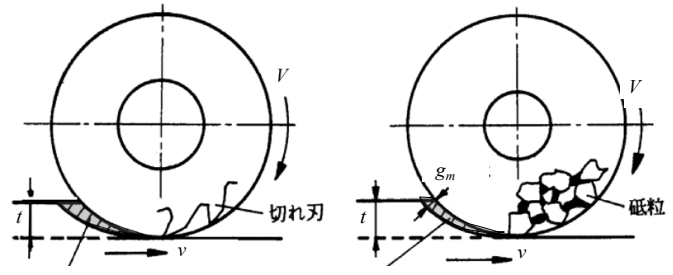


図 10 砥粒と工作物の干渉モデル



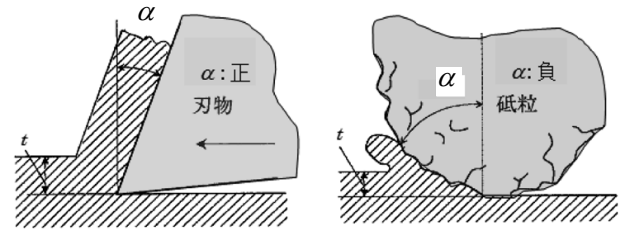
1つの切れ刃が削る領域 (a) フライス加工
砥粒1個が削る領域 (b) 研削加工

図 11 フライス加工と研削加工の類似性

作物の相対運動形態は似ているとも言えるが、砥粒切れ刃の位置はランダムであり、図 12 に示すように大きな負のすくい角 α を有するから、切りくずの排出も容易でない。結果、上述の上滑りと相まって、研削に必要なエネルギーは大きくならざるを得ない。このような研削加工の特徴をまとめると、次のようになる。

- a) 研削作用は、微細かつ不規則な形状・分布をしている多数の砥粒切れ刃からなる「多刃工具」による微細な切削作用の集積である。
- b) 砥粒には、非常に硬い鉱物質 (Al_2O_3 , SiC, ダイヤモンドなど) を用いるため、焼入鋼のような硬い材料でも容易に加工できる。
- c) 砥粒 1 個あたりの切削断面積は非常に小さいので、一般に仕上面粗さは小さく、加工精度も高い。
- d) 切削速度に相当する砥石周速度は高く、一般の切削速度の 10~50 倍に達する。
- e) 工作物の除去は、大きな負のすくい角を有し、かつ弾性的に保持された砥粒切れ刃でなされるため、加工に必要なエネルギーが大きく、加工温度は高くなり、加工面に熱損傷が生じやすい。
- f) 研削抵抗や熱衝撃によって砥粒は破碎あるいは脱落し、これに伴って新しい切れ刃が現れる。これを砥石の「自生作用」という。つまり、研削砥石の適度な損耗は切れ味の維持につながる。
- g) 砥石を使用するには、あらかじめその形状を整え、かつ砥粒切れ刃を突き出させるためのツーリング (形直し) とドレッシング (目立て) が不可欠である。

読者の皆さんは将来、このような特徴を理解した上で研削を科学するとともに、合理的に加工条件を選び、或いは新しい研削盤を開発することが求められる。しかし、研削を科学する上で難しいのは、切れ刃の形状のみならずその位置さえも決定 (定義) できないことである。



(1) フライス工具 (2) 砥粒切れ刃
図 12 フライス工具と研削切れ刃の作用状態

しかもサブミクロンの領域での切削作用をつぶさに観察した報告はほとんど無く、これを定式化することはさらに難しい。このため、多くの先人が研削を科学するために苦悩したことに思いを馳せていただきたい。

4. おわりに

筆者は、学部の卒業研究テーマとして、加圧研削 (定圧で角柱状工作物を砥石に押し当てて行う研削加工) に取り組み、砥石の表面状態と研削抵抗、加工速度などとの関係を調べた。その際、顕微鏡で砥石表面をいくら観察しても工具としての姿は皆目わからず、どうして硬い金属が容易に加工できるのか強い疑問を持った。筆者が、研削機構の解明に取り組んで来た思い出や温めていた疑問については、本年 1 月号の特集記事²⁾で述べた。興味のある方は、ご参照頂きたい。

次回は、研削砥石の種類や特徴、使用法の概要などについて解説する。研削加工の特性のほとんどは、研削砥石に起因しているので、よくご理解願いたい。

5. 参考文献

- 1) 奥山繁樹, 宇根篤暢, 由井明紀, 鈴木浩文: 機械加工学の基礎, コロナ社, (2013) 116.
- 2) 奥山繁樹: 工作物の除去機構への疑問を温めつつ歩んだ途, 砥粒加工学会誌, 59, 1, (2015) 13.