

最近の研削技術

大阪大学工学部 田中 義信

1. はじめに

研削仕上げが機械部品のいわゆる生産的な最終仕上げとして重要な役割をはたしていることは衆目のみるところでぜい言を要しない。このような普通の意味での研削加工においては近年その使用機械である研削盤をはじめ、加工方式、生産性などの点で極めて多彩な改良発展をとげていることもよく知られているところである。すなわち、自動サイクルによる加工、自動定寸仕上、工作物の自動供給、プランジ研削、多砥石研削、自動目なおし法などがそれである。

ところがここ10年来の研削加工の適用分野は、一般最終仕上げから更に精、粗という相反する二つの方向に向って、その範囲を拡大してきている。精密化は研削に対する従来の考え方からすれば正統的發展ともいうべきものであって、仕上げ面あらさ 0.04μ が得られるといわれる鏡面研削、寸法精度 0.2μ を目指している超精密研削などがこれに当り、従来のラップ仕上、超仕上、ホーン仕上などにとって代る場合も生じている。

粗加工あるいは高エネルギー加工分野への進出は重研削とか超重研削と呼ばれるものにその特徴をみることが出来よう。また研削というものを広い意味に解釈すればいわゆるベルト研削は高い生産能力を上げる砥粒加工法として着実にその適用分野が増大してきている。

これらの研削技術、特に最終仕上げという正統的意味での研削技術は、長年月にわたる研削機構に関する精緻な研究成果から生れてきたものであり、この分野の研究状況は極めて活発で興味深いのであるがその展望は別の機会にゆずり、本稿においては上にのべた精、粗両面に向っている、いわば研削加工の両端と最近高エネルギー加工法として注目されつつあるベルト研削とについて実用されているものを中心に解説することにする。

2. 鏡面研削

研削加工によって、ラップ仕上、超仕上、ホーン仕上と同程度あるいはそれ以上の仕上げ面と強制切込作業という利点を生かして高い寸法精度を得ようとする行き方は、外国のごく小数の高級工作機械または測定器の製作に比較的古くから採用されていたと推察されている。

しかし、一般の研削加工法として鏡面研削が紹介されたのは約10年前“Super-finishing by Grinding”の題名で

英誌に掲載されたのがはじめてであろう¹⁾。この方法は、よい仕上げ面を得るための最も常識的な考え方を採り、鏡面を得るために粗研削には #46程度の中目の砥石を用い、つづく各工程では #80, #150~250, #500 というように使用する砥石を細かくしてゆき仕上げ砥石としては #800~1000 の砥石を用いて低研削速度（周速約1000 m/min）で加工することによって鏡面を得ようとするものであった。この方法は当然加工能力の点で問題がのこされる。

一方わが国では、細粒砥粒を用いる方法ではなく、#60程度の常用砥石によってかなりな加工能力で、しかも鏡面を得られる方法が開発され実用化されている²⁾³⁾。

その要点は

品名	材質	熱処理	硬度	取しろ
プランジャ	窒化鋼		Hb 80	0.1 μ

- 加工機械 大隈 GPS-150×450型、サイクリック円筒研削盤
- 加工方法 トラバースカット生産的鏡面仕上げ作業
- 自動定寸 テーブルゲージ
- 砥石および砥石速度 A120-kmV 24''×1½''×12''
6,500fpm
- 加工能力 ドレッシング1回当り加工数 100個
1時間当たり加工数(平均) 12個
- 加工精度 寸法ばらつき 3 μ
あらさ 0.1S
真円度 0.2 μ
円筒度 1.5 μ
ふれ 0.5 μ
- 研削条件 粗 密 スパークアウト
主 軸 300rpm 100rpm
砥石切込 { 5 μ 1.5 μ 3strokes
— 1.5 μ 3 ''
ドレッシング { 75mm/mm
グ 40 ''

図1 鏡面研削の例

- (1) 特殊構造の軸受をそなえ、不整運動をなくし、振動にもとづく砥粒切刃の破砕を少くし、不揃いになることをさける。
- (2) 砥石車の目なおしを特に微細送りで行ない砥石作業面上には巨視的には一様に揃った平坦な砥粒切刃を出す。
- (3) 砥石の切刃を円滑に微量ずつ行なわせる。これは高精度の砥石送り機構によってなされる。

10年間の進歩で $\pm 1\mu$ の公差範囲が可能になり、最近ではこれが更に $\pm 0.3\mu$ というようにせばめられつつある。研削技術に限っていえば部品が高い精度で加工されるために基本的に必要なことは、いかにして必要な微量ずつ確実に砥石と部品とをお互に近づけるかにある。従来工作機械のほとんどの送り込み機構はしゅう動台を送りネジによって移動させる方式によっていたが、この方法ではすべり摩擦に本質的に附随するstick-slip（附着—す

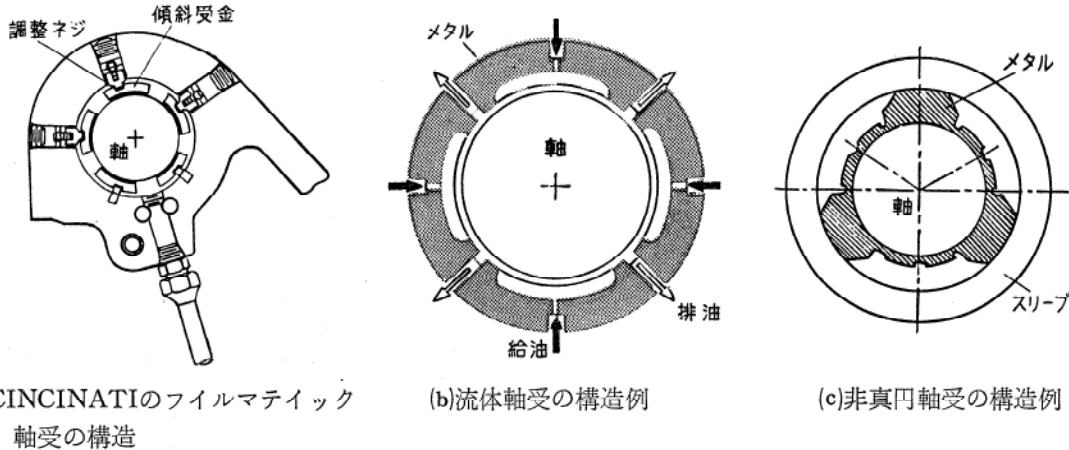


図2 各種砥石軸受の構造

図1に上の方法による代表的な加工例を示す。いずれにしても鏡面研削では砥粒の状態が大きな役目を果たすものとみてよいが砥粒の面からは数年前にアメリカで開発された多結晶砥粒44A（日本での相当品TA砥粒）を用いることによって 0.04μ 程度のあらさを得ているとも紹介されている⁴⁾。この場合には一つの砥粒の細かい結晶の一つ一つが極微細な切刃となるといわれている。砥粒にこの微結晶砥粒と同様な性状を人工的に与えたいわゆる微粒集合砥粒（ $2\sim 3\mu$ の大きさの酸化アルミニウム砥粒を酸化ニッケルで焼きかため、これを破砕して#46程度に揃えたもの）によっても研削時の砥粒の破砕が $2\sim 3\mu$ の大きさを単位としておこなうので微細切削が行なわれて鏡面研削が可能になる⁴⁾。

以上の鏡面研削に必要な条件の一つは、もちろん優秀な研削盤でこれらの機械には多面すべり軸受（図2a）、セグメント軸受（同b）、流体軸受（同c）などの、それぞれ特徴のある主軸軸受がいろいろな形で用いられ⁵⁾、たとえば $1\mu/100\text{kg}$ という高い静的剛性のある軸受部を構成している。これらの軸受部によって研削主軸は非常に安定な運動を示し、砥石軸の振動にもとづく有害な砥粒破砕も抑制され、生成されるあらさは、研削理論から幾何学的に求まる値へ近づいて行くと考えられる。

3. 超精密研削

3μ の公差の部品を容易に研削出来るようになったのは欧米においてもそう古いことではない。そしてその後

のべり現象または息つき現象といわれる）のために注意深く作られたすべり面、優秀な油、強剛な駆動機構を採用しても高々 $\pm 1.5\mu$ 程度の精度がやっとである。またすべり案内をころがり案内（たとえばBryant社内面研削盤）にかえるということは、いろいろな利点はあるがやはりそのきめ手はその移動機構にあるから、普通のネジ送りでは精度的に限界があるわけである。

このような限界をこえる一つの解決法として弾性変形を利用する送り込み方式を持った研削盤が数年前にあらわれた。図3は、このCeda/Size方式⁶⁾の動作原理図

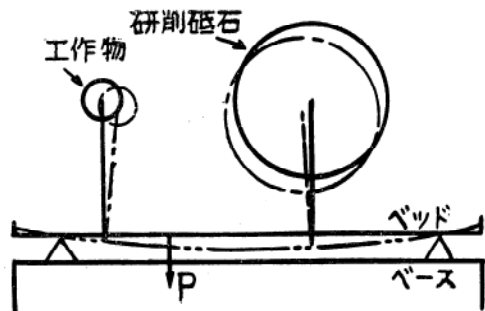


図3 最小切込装置の原理

で、レバーによってPなる力を加えてベッドの弾性変形を利用して工作物と砥石を近づけるのである。もちろん 1μ 以下の精度で研削を行なうには単に砥石近接機構だけで行なえるものでなく、砥石主軸用軸受並びに工作物支持部の精度剛性およびその安定性が極度に高く、かつ計測法もそれ相当な注意が払われていなくてはならない。Ceda/Size方式をとった研削盤は主軸として図2(b)

の例と同形式の静圧軸受を用い、計測装置としては抵抗線歪計を利用した、すべり摩擦部分のないはさみゲージが用いられているようである。

以上のような 1μ 以下の精度で確実に研削を行なうには、少なくとも最終切込み装置としてはすべり摩擦部分のある送り込み機構では極めて困難であって、いわゆる超精密研削が可能な研削盤には、たとえば十字バネと1/2, 000, 000 の運動縮小が可能なカム機構をもったもの

(Cincinnati 社)⁷⁾ が実用されており、そのほかにも、磁歪現象を利用した送り込み方式 (Cincinnati 社)⁵⁾、熱膨張を利用するもの (図4 Fortuna社)⁵⁾ などがある。

超精密研削がサーボバルブスプールなどはめ合い部品に実施される際には、従来のいわゆる互換性という考え方に逆行するものではあるが、match-grinding⁵⁾ と称せられるやり方がとられることもある。これは、普通には研削された内径をゲージとして、それと一定の clearance を有する外径を、精密な計測ならびに制御装置と研削盤とを組み合わせることによって加工するものである。

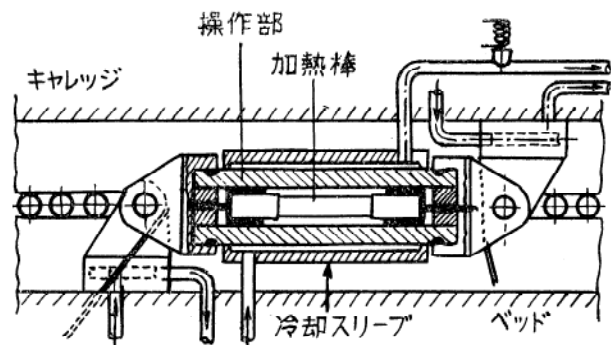


図4 熱膨張を利用する送り込み方式 (Fortuna)

4. 重研削

研削加工の発展の一つの方向として、精密化と逆の行き方をとる重研削が挙げられる。常識的な研削加工よりるかに高い加工能率を示す作業はバリ取り等において古くからあったが、最近では更にこれらの加工速度が高まる一方、平面研削を発展させて、極言すれば、たとえばフライスなどによる切削を研削におきかえようと意図するほどの加工速度とある程度の精度を得る方法が最近急速に発達して来ている。前者はスナグ研削 (Snagging) とよばれ、鍛造品のバリ取り作業を手持ち、またはつり下げ式研削機で行なうものと、スラブやピレットの皮むきを砥石を強圧で工作物におしつけて非常に高い加工能率で行なうものがあげられる。表1⁸⁾ はここ十年間にピレット研削がどのように高能率化されたかを示すもので、最近ではかつての研削能率の3倍程度にもなっていることがわかる。また比較的最近の1加工例の結果⁹⁾ を示すと図5のようで、1時間当たり 200kg程度の研削量もめずらしくないことがわかる。この場合の所要

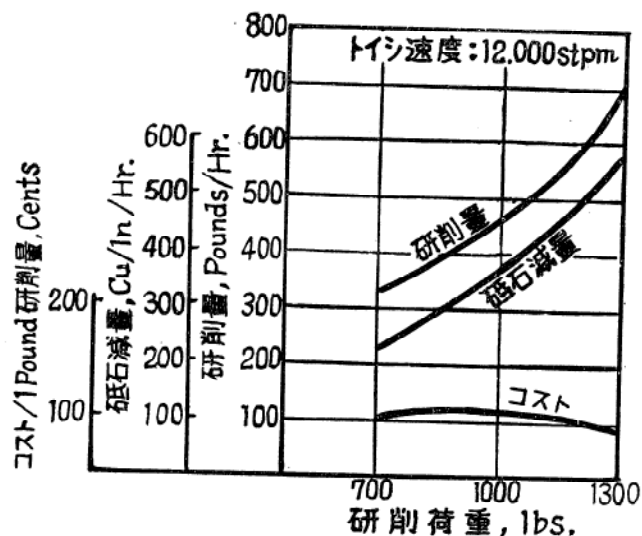


図5 ピレット研削における荷重の影響 (CLark)

表1 スナグ研削の変遷 (Mueller)

年 代	1950	1958	1962
機 械	吊下げ式	自動ピレット研削盤	自動ピレット研削盤
砥石車寿命(時間)	12	5	2
総研削量 (lb)	630	746	1116
1時間当たり研削量 (lb)	53	149	140
研削率	7	8	11

馬力は60~75HPといわれる。

以上のような作業には、特別に堅砥に作られたレジノイド砥石が用いられるが、表1、図6からもわかるように砥石損耗が大きな値になる。そこで最近の砥石には、強靱な多結晶砥粒——1個の砥粒が多数の結晶から成り破碎脱落の単位が小さいので長もちする——を用いたり、焼結砥粒——微粒砥粒を焼結して、一定形状粒度の砥粒に作ってある——などが用いられている。また砥石自身もガラス繊維あるいは鋼線で補強した構造のものが作られている。このように注意をはらった砥石でも34" 径のものが半日で 20" に損耗することもあるほど苛酷な研削条件が用いられるのであって、超重研削といわれることさえある。

一方、加工能率と精度の両方をねらった重研削は、たとえば強力な平面研削盤 (最高250IP 程度である) によって、1回の被加工物セットアップで粗加工から仕上げまでやってしまう行き方にその特徴をみることができる。これに類する加工は従来立旋盤とかフライス盤などによって行なわれていたものであるが、これを平面重研削にかえて加工能率を上げ、コストダウンをねらっており、アメリカの代表的な砥石メーカーである Norton 社ではこ

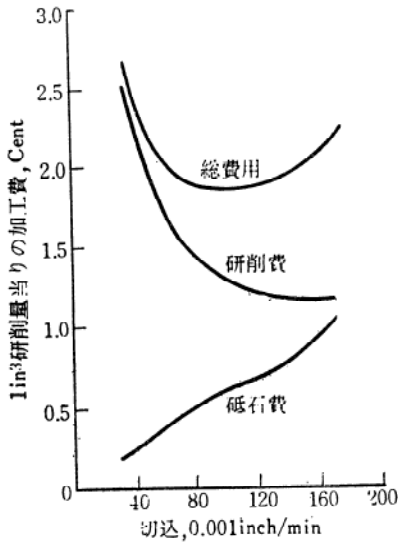


図6 切込とコストの関係 (PATTERSON)

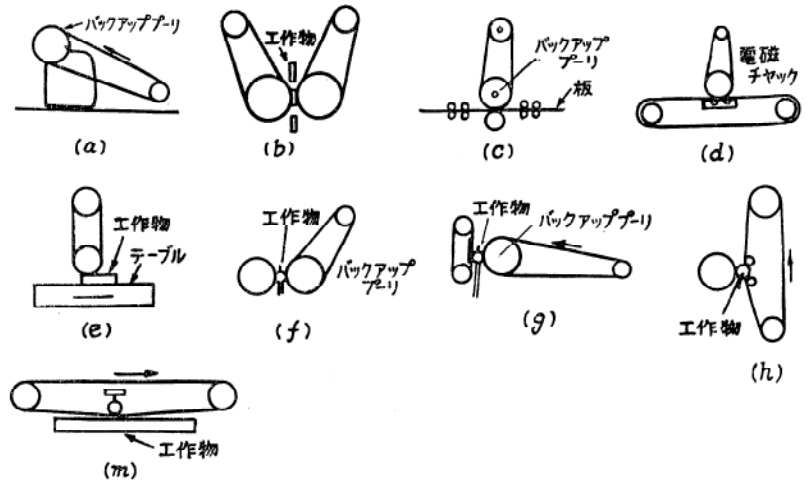


図7 アブラシベルト盤の作業方式

れを砥粒切削“Abrasive Machining”とよんでいる¹⁰⁾。砥粒削切によるコスト低下の一例をあげると表2のようである。ところで、このような重研削では加工能率の上昇(切込, おくりなどの増加)によって研削費は減少してくるが, 単位加工量当りの砥石損耗が増加するという問題があるので, これらの兼ね合いから最適条件をみつければならない。図6はアメリカでの実例で, 研削能率(切込速度)とコストの変化状態を示したものである¹¹⁾。この場合には約2.5mm/minの切込み速度が最適の条件ということになる。

5. ベルト研削

砥石車のかわりに1000~2500 m/minの高速で運動する研磨布紙を用いるベルト研削もまた高効率加工法として近時急速に注目をあびるようになった。これは砥石車を用いる重研削に比べれば, 砥粒1個当りの研削能率を考えると必ずしも高くないが, たとえば幅2000mmにも達する幅広研磨ベルトなどによって極めて高効率の加工が期待できるのである。

ベルト研削が最近金属の機械加工に多用されるようになったのは, 合成樹脂接着剤の進歩により, 砥粒の基材(布, 袋織, 洋紙類)への結着が強固に行なえるようになり強力な粗研削が行なえるようになったこと, 更にゴム製コンタクトホイールなどをはじめとする各種保持円筒, もしくはベルト支持工具の考案により多様な加工が行なえるようになったためである。これらに加えてベルト研磨機が比較的構造簡單で, 研磨ベルトもその構造上よく空冷されかつ可撓性をもっているので焼け, 割れなどのトラブルも少ないなどの利点を具えているために, バフ研磨の部門などではその85%がベルト研削に置き換

表2 重研削作業と旋削作業の比較

料 料: 単鑄鉄 作業: 各側面より, 3.175 mmを削り普通の仕上面および公差に加工する。		スケッチ: ラップ板 研削面積 = 1094 cm ²	
作業データ	旋削	重研削	
機 械	立タレット旋盤	#18 Blanchard	
工 具	超硬バイト		
馬 力	30		
取 付 個 数	1 個	1 個	
速 度	普通	普通	
送 り	荒切削 2回 仕上切削 2回	荒研削 2回 仕上研削 2回	
工作物1個当りの削り代	42.41in ³ .(696cm ³)	42.41in ³ (696cm ³)	
工作物1個当りの正味加工時間	23 min	9.46 min	
加工能率	1.85in ³ /min (30.3cm ³ /min)	4.5 in ³ /min (73.8cm ³ /min)	
1個当りの全作業時間	28.95 min	14.96 min	
1個当りの全費用	903.6円	568.8円	
準備費用	360.0円	334.8円	

備考 “Abrasive Machining” は, 費用を27%ほど低減し, また生産能率を47%ほど増大せしめた。

えられた例(アメリカ)もある。

金属加工関係でベルト研削が特に成果を挙げている実施分野はステンレス鋼, アルミニウム合金などの板状, 帯状の広い加工面を有する材料の連続加工, タービンブ

レードなどの研削研磨加工，研磨ベルトの可撓性を利用する曲面加工，チタン合金など従来の研削加工法では加工困難な材料の加工などが挙げられるが，その研削の形式としては図7のような多種多様な方法がとられている。到達できる加工精度は通常作業の場合 $\pm 0.025\text{mm}$ ，細粒のベルトと低研削圧を用いると $\pm 0.013\text{mm}$ 程度，また心無研削作業や円筒作業では普通 $\pm 0.013\text{mm}$ 程度であるといわれている。研磨ベルトによく使用される粒度は#40~400の範囲で，粒度の粗いもの程加工量が多いが逆に仕上面は悪くなる。加工量は研削の形式によって変化し，一概にはいえないが鋼などを粗いベルトで研削する場合数十 $\text{gr/cm}^2/\text{min}$ のオーダーとみて支障ない。仕上面あらさは上記ベルト粒度範囲に対して $0.5\sim 30\mu$ とみてよいであろう。

む す び

以上，研削加工技術における精，粗の両端と，やや異色の研削技術として注目されてきたベルト研削について述べた。研削技術の今後はこれらの両端を更に伸ばす方向に向うと思われるが特に前者については，ここで述べた技術の限界をこえることは容易なことではあるまいと思う。たとえば，精度 0.2μ という数値は計測器におい

てさえそうたやすく得られるものではないし，その寸法精度というものの物理的内容や，また機械部品の機能上それがどういう意味を持つものであるかという疑問さえ湧いてくる程である。

重研削においても現在の加工能率を大幅に上げるには砥石あるいは砥粒のもっている強度，機械の能力，経済性などの兼ね合いでかなり色々な問題がでてくるものと思う。従ってこれらの壁をのりこえることはもちろん重要なことではあるが，ここで述べたレベル或いはそれに近いものをより一般化することも機械加工技術としての研削が目標とすべきことだと考える。

文 献

1. Machinery (London) Nov. 13 (1953) 972
2. 長岡；日本機械学会誌 61 469 (昭33) 169
3. 横川，阿部；機械の研究 15 9 (1963) 1127
15 10 (1963) 1265
4. 佐藤；砥粒加工 1 1 (1964, 6月) 3
5. Pahlitzsch; Microtecnic 17 6 (1963) 231
6. Raymond Spiotta; Machinery(N.Y) April 1962, p. 108
7. Machinery (N.Y) Sept 1962 p154
8. J.A. Mueller; Grinding & Finishing April(1963) p.35
9. J. Clark Jr; Grits & Grinds 51 10 (1960) 3
10. L.P.Tarasov; American Machinist April 16 (1962)
11. M.M.Patterson; Grinding & Finishing June (1963) 26