

工作機械の構造と加工精度

加工過程中における変形と加工精度への影響について

大阪大学基礎工学部教授 山 本 明

1. はじめに

工作機械を量産あるいは能率的な、また経済的な加工に使用するばあい、工作機械のもつ精度以上の精度をもつ製品を要求しないのが普通である。工作機械は弾性体・熱伝導体で構成されているので、外力によって変形・振動し、局部的に異なる温度上昇によって変形を生じることが免れえない。個々の構成要素に注目するとき、その変形が工具位置における変位に及ぼす影響量は要求する加工精度に比べて同じ位か、あるときには目をみはるほど大きいことが多い。ところが、実際ではこれらの影響は打消されたりして総合精度すなわち製品精度としてはかなり小さくなることがありうる。高精度・高性能部品を製作しようとするとき、この素性のはっきりわからない、あるいはいきあたりばったりの打消効果を期待することは間違いといわねばなるまい。このためにその性状を把握し、対策を講じておくことは必須のことといえる。

製品の加工精度は加工中における工作物と工具の間の時々刻々の相対位置の変化に原因する。この相対位置は多くの変動する因子の複雑なからまりあいによって不安定に変化する。高精度加工がしばしば人の熟練度に頼ることが多いのは、機械なり加工技術なりで制御しえない不安定要素を人の経験と勘によって制御しようとするのである。生産合理化の立場から、これを最近めざましい発展をみつつある自動制御によって解決しようとするとき、また寸法の適応制御を考えようとするとき、やはり不安定因子を安定化し制御する方法とか、これらと加工精

度との関係を明らかにしておく必要があることはいうまでもない。この知識は能率よく加工を行なうためにも当然要求される。

加工精度向上をめざしての工作機械の構造の改善と制御に関する研究は、ここ十数年来非常に盛んになってきた^{1)~6)}。どちらかといえば、アメリカではとくは振動・制御などについての理論的研究が多いのに対し、地味なかつ資材と労力のかかる実際的な基礎研究はヨーロッパに多い。イギリスが工作機械における伝統的なかつての優勢を取戻そうとして、国策として研究体制の確立と研究施設の整備・研究の援助をとり上げ、研究推進に取組んだことも盛上りの一原因である。わが国でも、この刺激と工作機械工業会などのバックアップによって、最近多くの研究発表がみられるようになった。

加工精度に注目するとき、工作機械の構造部分にはすべてといてよいほど精度に影響する要素が多くそれぞれ問題点をもっている。本稿は紙面の都合からこの宿命的問題のイントロダクションとして、旋削と研削を例にとり、その加工過程で起こる問題点を提示して簡単な説明をするにとどめる。これらはとくに超精密加工の立場から心得ていてほしいことである。

ここでは、振動すなわち動剛性に関係した問題は割愛することにした。振動は加工精度と仕上面を悪くし、工具寿命を短かくする。そのみならず、振動を避けようすると、とりうる切削条件範囲が寸断されたり、また一般的には切削速度か切削面積を小さくせねばならず生産能率を大いに低下させる。上の寸断はNCを含む自動工作機械の効用を妨げる。工作機械は多くの要素で構成された複雑な構造をもつので、

設計の段階でびびり振動（自励振動）に対する安定・不安定を予知することはもちろん、実機で現に起っているびびり振動に対する改善手段が容易に発見できない事情にある。期待した生産能率の低下はおろか、その工作機械の存在価値さえ奪いかねないので、最近工作機械の動剛性に関する研究が盛んに行われるようになった。これはいろんな切削手段におけるびびり振動の発生機構の把握、工作機械の動特性の有効な測定法・解析法の確立、現有工作機械の動特性データの整理、設計段階でびびり振動に対する安定・不安定したがって安定限界を知るといった方向に進みつつあり、かなりの成果を挙げつつある。

2. 加工精度に影響する因子

加工精度はつぎのような内容をもつ。

形状精度：真直度・平坦度……，真円度・円筒度……，直角度……

寸法精度・表面状態：公差の大きさ，あらさ，うねり，加工変質層の状態……

もちろん製品は作られた直後に要求される精度・表面状態・性状に適合するほか，使用中・保存中においても好ましい状態を永く持続する，すなわち寿命の長いことが要求されることはいうまでもない。

加工精度に影響する因子として，いわゆるミスを除くと，つぎのものが挙げられる。

- (1) 工作機械の運動の正確さ：幾何学的精度（直進精度・回転精度・母性原則の精度など）これらは無負荷の状態で成績が評価されることが多い。主として構造部品の加工精度・組付け精度とか性能に関係するほか，バックラッシュ，ヒステリシスなど摩擦に原因するものもこれに加わる。
- (2) 機械構造・加工物・工具などの剛性：変動荷重（切削抵抗・自重など）による弾性変形と，がたに関し静剛性，変動荷重と慣性力による振動に関し動剛性。
- (3) 振動源の存在
- (4) 熱膨張と熱変形
- (5) 工具の摩擦
- (6) 加工材料の被削性と加工条件

さらに長期的にわたる製品寿命を考えると

(7) 材料の選択，熱処置，加工方式，あと処置も問題になる。たとえ高精度加工機，スケール・ゲージを含む精密機器では，加工変質層と材料の安定性（経年変化）が問題になることが多い。

つぎに加工に当たって，生産速度の上昇・生産コストの低減・熟練度の排除・不良発生率の低減などの見地から，一般につぎのことも考慮すべきである。

(1) 必要以上の精度に加工することは無駄である。この精度は作るべき製品の性能を保証するために根拠をもって要求される値でなければならない。

(2) 許しうる公差内で要求する精度・表面状態をもつ製品が確実にえられる工作機械を使用し，かつその精度が経済的な最適条件の下で少ない工数で楽に出せること。

ところが，高精度・高性能部品の製造では，工作機械とか計測器の発達を歴史をみるように，フロックをねらい，熟練度を必要とし，コストも度外視しなければならないようなことも起こる。これは決してのぞましいことではない。

3. 切削過程で生じる変形が加工精度に及ぼす影響

3.1 剛性について

加工精度はすでにのべたように，工具と工作物の加工中における時々刻々の相対位置で基本的に定まる。剛性とは変形あるいは振動の生じにくい性質である。機械を構成する単一要素だけでなく，これらの要素が構成する系の総合剛性が重要であり，機械構造部分—工作物—工具系の剛性が問題となる。

静剛性はばね定数で表わすのが普通である。荷重には切削抵抗・摩擦抵抗のほか，構造部分・加工物の重量も考えなくてはならない。引張・圧縮による変形量よりも曲げ・ねじりによる変形量のほうが大きく，曲げ剛性は（静荷重）/（荷重点のたわみ） $[\text{kg}/\mu]$ ，ねじり剛性は（曲げモーメント）/（荷重点の移動） $[\text{mm kg}/\mu]$ であらわす。

これに対し，動剛性では加えられた力とこれ

によって生じる変位が位相差をもつので、ばね定数に相当するものは複素数で表現される。普通、メカニカル・インピーダンス（力/速度）が用いられており、これは工作機械に加工物とか切削力がかかったときの様子を知るために便利である。

さて、加工過程で問題となる総合剛性にはつぎのものが関係する。

(1) 機械構造部分の剛性

- a. 構造部分：荷重の種類と大きさ，材質，寸法，形状，支持方法
- b. 結合部
 - 固定結合：ボルトの位置，寸法，数，フランジ寸法，しめつけ力，表面あらさ
 - 運動結合：軸受・案内面の形状・寸法，バックラッシュ，油膜厚さ，ステイック・スリップ

(2) 工具の剛性：工具の形状・寸法，張出し長さ，砥石性質など

(3) 工具支持具の剛性：フライスアーク，中ぐりバー，砥石軸，工具台，固定法

(4) 工作物の剛性とその支持方法の剛性

このうちで結合部の剛性はかなり低く、これが総合剛性を大きく支配しているばあいもみられる。しかし、振動に対しては結合部は大きな減衰をもたらす、よいほうに働らく。最近、この結合剛性もよく研究テーマにとり上げられており、非常に重要なことが分ってきた。たとえば、ベースはフランジを介してボルト結合されたコラムが曲げをうけると、結合部接触面の圧縮側では、二面のあらさの噛みあう突起部がへたることによって、また引張り側ではタイボルトだけが引張りをうけるのでその伸びが大きいため、結合部で大きな変位を起すのである。

総合剛性は

- (1) 構造の構成，形状，組立が複雑である。
 - (2) 加工条件によって作用力の大きさと方向，その相互関係が変化する。
 - (3) 作用力の着点移動する。
- ためは機種，また一つの工作機械でも作業内容，加工条件によって複雑に変化する。例えば、円

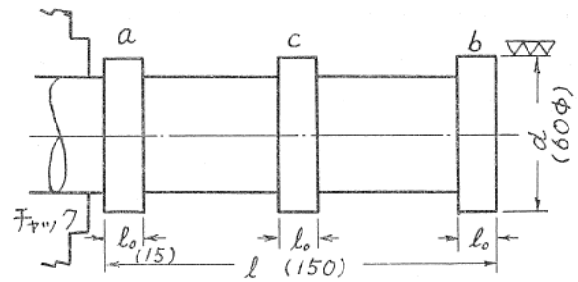


図1 外丸削り精度の試験法（JIS B 6202より）

a, b, cの部分を加工し、45°ごとの4直径を測定し、真円度と円筒度が許容値以内にあるかを調べる。図の寸法は工具旋盤およびベッド上の振りが300以下の普通旋盤のばあいで、前者の許容値は真円度0.005，円筒度0.01，後者ではこの2倍まで許される。

筒の直径が場所によって変化するのは切削点の移動に伴ってそこでの変位が変化するからである。このために、精度検査の実施に当たってはつぎのような実用試験が必要である。

(a) 切削箇所と切削条件を変える（図1）……変動剛性比

(b) 形状誤差を与えた工作物の誤差除去率（次項3参照）また研削における必要なスパークアウト回数，これらは目的とする切削量，あるいは前加工誤差の除去を，したがって所要の加工精度をいかに早く達成できるかを判断する尺度ともなる。

3.2 加工過程中における変形が加工精度に及ぼす影響

二、三のばあいについて、製品精度におよぼす種々の変形の影響程度の大きさを示してみよう。

1. 旋削のばあい センタ仕事を考える。主軸は切削抵抗はよってたわみ，かつ軸受も有限の剛性をもつので，センタ先端では図2下図のように変位 $x_1 + x_2$ を生じる。ここでは，軸受の剛性はばねで表わされ， k_1, k_2 は前後軸受のばね定数である。これは軸受がすきまと油膜をもつこと，仕上面あらさ，受座の仕上がり，組立誤差，軸受の予圧（preload）に関係する。一方，切削抵抗によって図3のようにベッド，サドル，工具台，工具も変形する。

簡単のため，水平面だけで変位を考えることにし，かつ以上のいろいろな場所での変形の影響を総合して主軸センタおよび心押センタのバイ

ト刃先に対する相対的な剛性におきなおして扱うことにし、これを仮に $k_1=15 \text{ kg}/\mu$, $k_2=30 \text{ kg}/\mu$ とする。また、工作物の大きさを $40\phi \times 300$ とし、切削抵抗の背分力（水平分力）を 60 kg としてみよう。

このときの製品の円筒度を最大と最小直径の差であらわすと図4のようになる。付記の式の δ と y は切削点が主軸センタより x の距離にあるときの工作物のたわみと軸受剛性によるバイト刃先に対する工作物中心軸の移動量を与える。すなわち δ と y だけ中心軸がにげるので工作物直径はそれだけ大きく仕上がる。このばあい δ のほうが大きく、工作物はたいこ形に仕上がる。もし y のほうが大きければつづみ形に仕上がることはいうまでもない。

このほか、発生する切削熱による工作物の膨張は工作物直径を小さくするように働く。この温度上昇に基づく誤差は大きくて、例えば工作

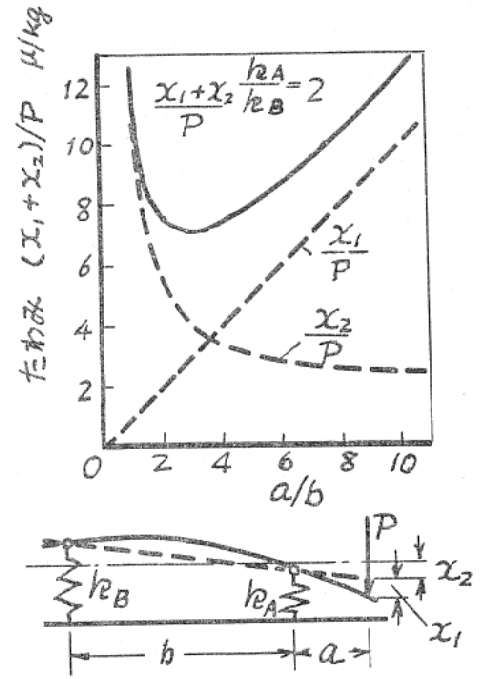


図2 主軸の変形 (Honrath)

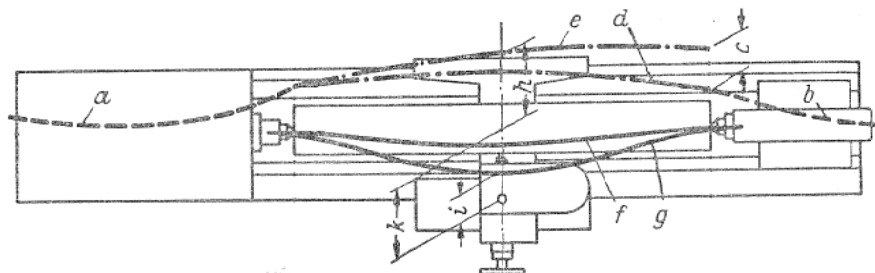


図3 旋盤ベッド・サドル・工具台の変形

物の切削開始端と終了端とで工作物の平均温度が 20°C 進ったとすると、軟鋼では $\Delta d = -\alpha \Delta t d = -9.2 \mu$ だけ終了端の直径が小さくなることになる。この影響はここでは工作物のたわみについて大きい。

さらにバイトの摩耗に伴う刃先の後退も関係し、これは直径を大きくする。熱膨張と工具摩耗ははじめに工具をセットして使用するタレット旋盤、自動盤、フライス盤、ホブ盤などでとくに量産のばあい注意すべき事項である。図5はこの1例である。摩耗の進行に伴って切削状態が悪化するので、さらに発熱量も増し温度上昇を増すことはいうまでもない。図では摩耗に伴う直径増加が大きくなっているが、いまバイトのにげ角を 6° 、工具寿命判定基準を $V_n =$

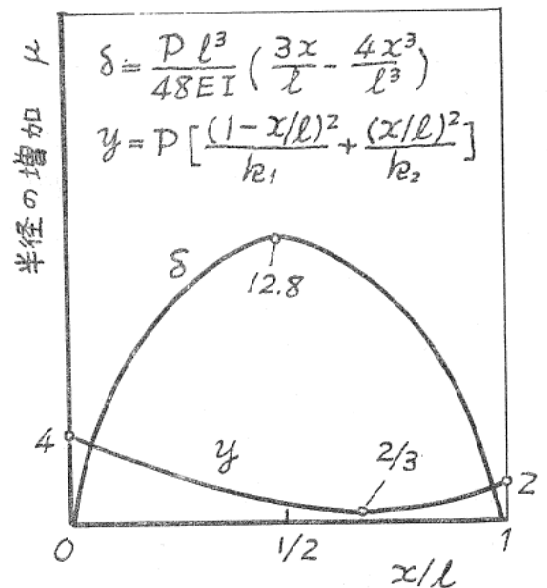


図4 工作物および軸受のたわみの影響

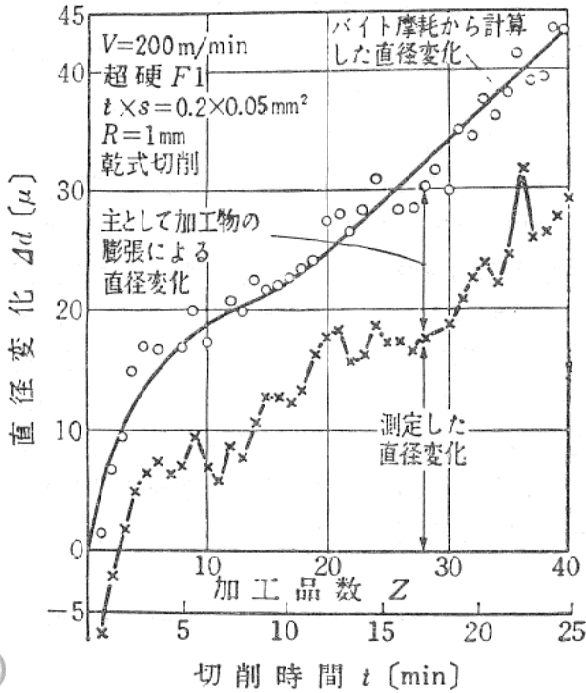


図5 乾式旋削における熱膨張とバイト摩耗の影響 (Schuler ほか)

0.6 mm とすると、寿命点における刃先後退量は 0.063 mm、直径増加量で 0.126 mm となる。しかし工作物 1 個の円筒度でいうと、上で扱ったものよりかなり小さい。

2. 研削のばあい 例として、円筒研削作業を静剛性の立場から考えてみよう。旋削のばあいよりもさらに弾性変形する部分が多い。図6は砥石—工作物—工作物支持部分が構成する加工系について剛性が問題となる部分を示したものである。

固定結合部と運動結合部が機械の総合剛性上最も弱い部分となることが多い。例えば砥石—主轴受に玉軸受を使ったものでは砥石軸剛性が数 kg/ μ にみたないたわみやすいものもあるが、円筒研削盤のように砥石が軸受に近く、精度に留意した設計のものでは 20~60 kg/ μ 程度で、中には 100 kg/ μ といった剛性の高いものも作られている。図7はある円筒研削盤における剛性にもとづく変位置を示した例で、この機械で

* 1例を示すと、穴径 19 mm 長さ 18 mm の穴を研削する砥石軸で 0.27 kg/ μ 、また穴が深いところにあるために張出し量が長く軸径 26 mm 張出し量 352 mm の軸では 0.03~0.06 kg/ μ であった。

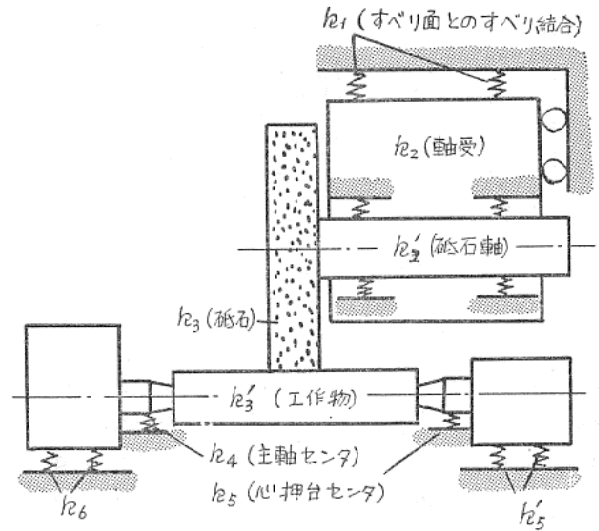


図6 円筒研削盤の加工系の剛性 (塩崎) k はばね定数

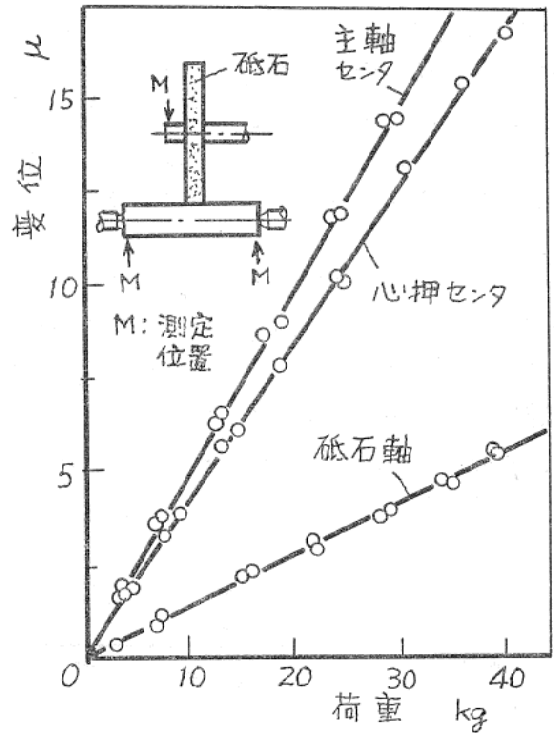


図7 砥石軸端およびセンタの変位置 (Singhal)

はセンタ剛性がかなり低いことがわかる。

さらには内面研削砥石軸となると、軸径が細いうえ突出量が大きいため砥石軸剛性が 0.1 とか 0.01 kg/ μ のオーダーまで低下するものもみられるという*。このために切込みを与えると図 8 (a) のように砥石作業面が工作物軸に対して傾き、さらに送り込むと砥石はその砥石作業面にそって案内されるのでますます変位し、穴は深

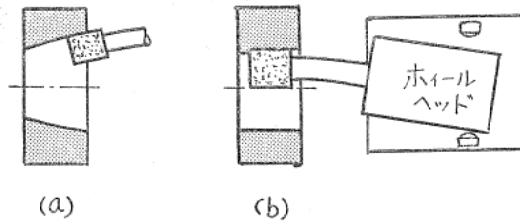


図8 内研砥石軸の変形とその対策

くなるほどすばまるといった形状に仕上がるのが普通である。このために、実際では仕上げるべき穴の軸方向長さを小さくとることが多い。ヒールド (Heald) 社が採用した方式は図8(b)のように砥石台を傾けて砥石作業面が穴の軸は平行になるようにするとともに、抵抗制御研削 (controlled force grinding) を行なう。

つまり内研軸はたわみやすいので、初期の実際切込み量は非常に小さい。そこでこの切込み量を切削抵抗の大きさに制御しようというのである。また、加工能率を上げるため、あとの図9で説明するような加工サイクルをとる。これで切残し量も一定となり、寸法精度も安定する。

研削砥石もまた弾性体である。砥粒そのものの弾性係数は鋼の約2倍であるが、結合剤はその約 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 、そのうえ空孔をもつので砥石全体の弾性係数は鋼の $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{6}$ ぐらいの小さな値である。このために、切削を行なう砥粒切刃はばねで支えられたようになっており、砥粒切込み深

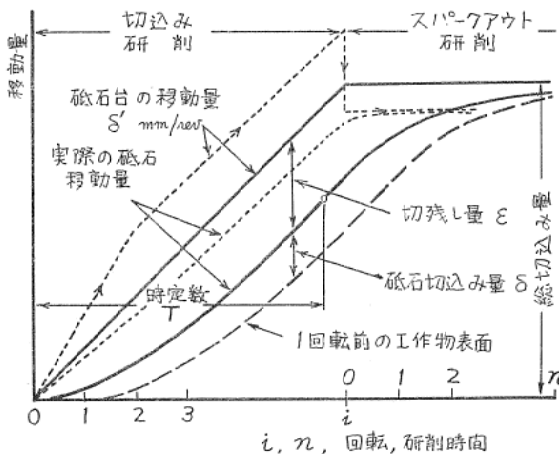


図9 プランジ研削における実際の砥石切込み量と切残し。点線は抵抗制御研削における加工サイクルのばあいを示す。また、時定数 T (総切込み深さの0.63まで切込むに要した時間) が小さいほど、研削系の剛性は高いといえる。

さが小さいときはは弾性変形して上すべりして切込めないとか、あるいはみぞをつけるだけで切りくずを発生しないばかりも起こる。

これら砥石を含む加工系の弾性変形とか運動結合部分のすきま・がたに加えて、砥石作業面には切削にあずかる切刃が点在しており、その高さも不均一であること、振動を伴うこと、砥粒が上すべりをしたりかえりを生じること、砥粒切刃が摩耗することなどによって、砥石台を送り込んだ量だけ工作物表面を切取れず、切残しを生じる。このために寸法と表面精度が悪くなり、仕上研削では少なくとも2~5回のスパークアウト研削をしなければならぬことになる。

つぎにプランジ研削を例にとって、この切残し量を考えてみよう。砥石台の強制切込み量を δ' [mm/rev] とすると、砥石と工作物間は弾性変形とかがたによって相対変位量 ϵ を生じるので、実際切込み量は $\delta (= \delta' - \epsilon)$ となる。この ϵ は切残し量にほかならない。図9のようは研削回数をまずはつれてこの切残し量は蓄積していき、このために研削圧力 (法線分力) も増加していく。スパークアウト研削に移ると $\delta' = 0$ なので ϵ が減少していくことはもちろんであるが、この様子は漸近的である。実際ではこの上に砥石摩耗量 (損耗量) が加わるので $\epsilon = 0$ とはならない。図8でのべた抵抗制御研削ではこれらの欠点をカバーするために、また加工時間を短くし切残し量を一定におさえるために、図9は点線で示すような加工サイクルをとる。

ここで、 ϵ は δ は比例するとし $\epsilon/\delta = \alpha$ とくと、この α は単位量だけ砥石を切込むためには加工系がどれ位たわむかを示す定数となる。加工系の研削個所における総合静剛性を k_M [kg/ μ]、砥石に加わる研削抵抗法線分力 P_n と実際切込み量 δ の間は直線関係があるとしてこの比 (研削剛性ともよぶ) を k_G [kg/ μ] とすると

$$k_M = P_n / \epsilon \quad k_G = P_n / \delta \quad \therefore k_G / k_M = \alpha$$

の関係が導ける。 α は研削剛性に比例し、静剛性は反比例するのである。作業内容によって k_G は変化するから、 α も変化することは注意がいる。研削盤では k_M が小さいうえ、研削比抵抗

は切削のばあいの数十倍以上に達するので α はかなり大きな値になる。円筒研削では1前後のことが多いが、内面研削では10以上の値になることがしばしばある。

さて、プランジ研削において、 i 回だけ一定切込み量 δ' で砥石台を送り込み、ついで n 回スパークアウト研削したときの最後の実際切込み量は

$$\delta_{in} = \left\{ 1 - \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right)^i \right\} \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right)^n \delta'$$

で与えられる。切込み研削のみであれば(……)の項を省けばよい。 α が大きいと式からわかるように δ_{in} は非常に小さくなる。 α が小さいほど望ましいことはいうまでもない。

図10はプランジ研削においてスパーク研削を行なったのちの仕上面あらさと切残し量を調べた結果で、強制切込み量 $\delta' = 10\mu$ は対し実際切込み量 $\delta = 7\mu$ で、あらさまで含めた全切残し量 a_1 は 8μ もある。

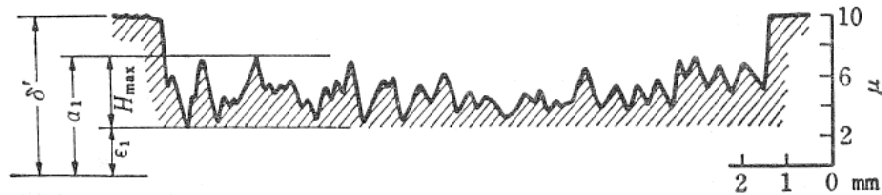


図10 切残し量の一例 (塩崎)

円筒研削, WA 60K, 焼入れ鋼 (HRC 55), $V=1500$ m/min, $v=8.5$ m/min, $\delta=0.01$ mm, 実測値: 実際切込み量 $\delta=7\mu$, 最大あらさ $H_{max}=5\mu$, 弾性による切残し $\epsilon_1=3\mu$, 全切残し $a_1=8\mu$.

3. 取しろが変化するばあいの切削, および工作物が前加工誤差・取付誤差をもつときの誤差除去率 あらかじめ真円度とか平坦度など形状誤差を与えたときの誤差除去率が工作機械の剛性を調べるための実用試験としてふさわしく, またこれは所要の加工精度をいかに早く達成しうるかを判断しうる尺度ともなりうることはすでにのべた。例えば研削において, i 回送り研削を行なったのち n 回スパークアウト研削をする。図11に示すように, はじめの形状誤差を δ_r , 最後の形状誤差を δ_r' とすると誤差除去率は次式であらわされる。

$$\frac{\delta_r'}{\delta_r} = \frac{\alpha}{\phi} \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right)^{i+n} \left\{ \left(\frac{1+\alpha}{\alpha} \right)^\phi - 1 \right\}$$

ここで, ϕ ははじめの形状誤差の1回転当たりの砥石強制切込み量に対する比 δ_r/δ' で, $\phi \leq n$ とする。図12は除去率におよぼす α, ϕ の影響を示したもので, $\alpha (=k_G/k_M)$ が小さい, すなわち加工系の剛性が高いほど所要精度をうるため

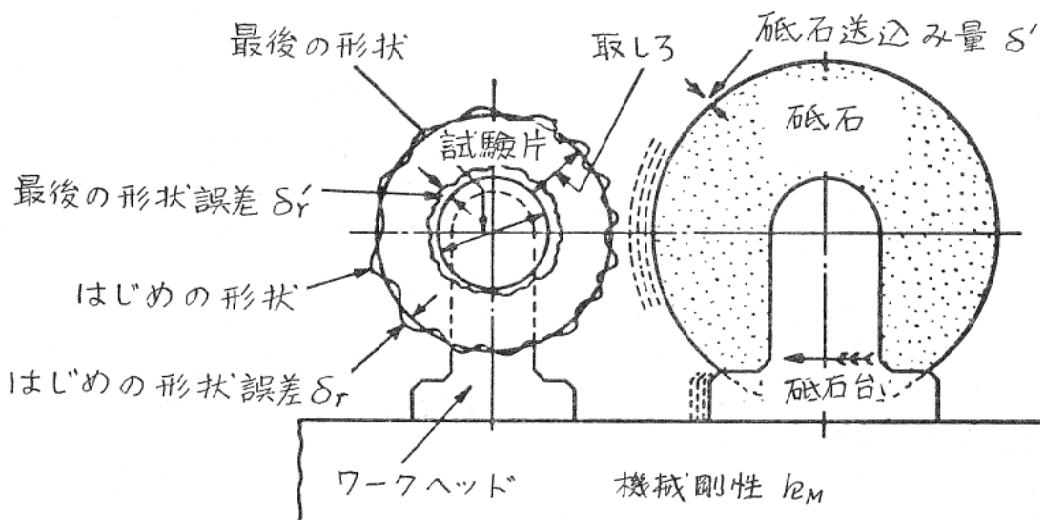


図11 形状誤差除去率の試験法

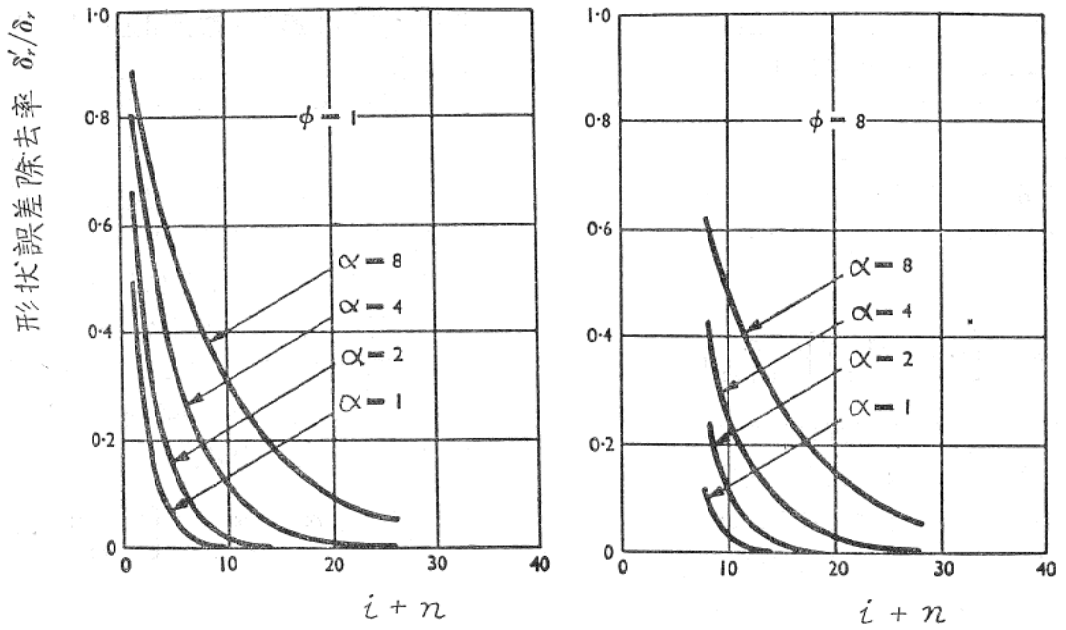


図12 誤差除去率に及ぼす加工系の剛性, 砥石切込み量の影響 (PERA)

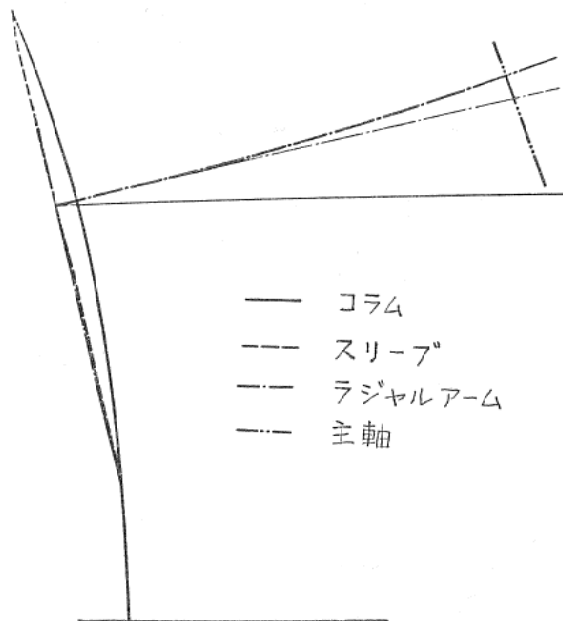


図13 ラジアルボール盤の変形

の研削回数が減り, 経済的なことがわかる。また, 切込み θ' を大きくすると ϕ が小さくなるからやはり研削回数をへらすことができる。形状誤差をもつとき, 時々刻々砥石の切取りしろが変化するので, 振動を生じやすい。

4. ボール盤, フライス盤のようなコの字形の構造は剛性が非常に低下する。図13はラジアルボール盤のよく知られた変形状態を示したもので, このためには工具中心位置がずれ工具中心線

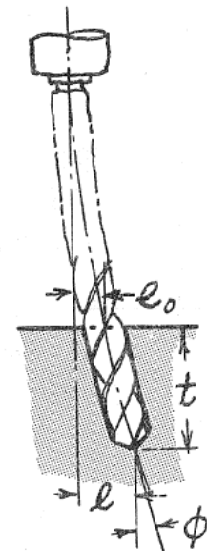


図14 機械構造の変形によって起こるドリル先端位置のずれと傾き

も傾く (図14)。そのうえ, このままの形で工具は下方へ送り込まれるから, 工具は曲げられて折損したり, 穴が上下端で非真円にくり拡がる。このような自重と切削抵抗による変形を考慮して, 例えば旋盤ベッドは中高に, ボール盤・横フライス盤では前下がり(ニーは前上がり)は作られるのが普通である。

参考文献

つぎに表題に関し教科書的なものと主要文献を挙げる。

- 1) F. Koenigsberger: Design Principles of Metal Cutting Machine Tool, Pergamon (1964) (原著: Springer (1961)). 和訳 (塩崎進): 工作機械の設計原理, 養賢堂 (1967).
- 2) D. F. Galloway: Machine Tool Research, Design and Utilization, Proc. Instn. Mech. Engrs. Vol. 175, (1961).
- 3) S. A. Tobias: Machine Tool Vibration, Blackis (1965) (原著: Carl Hanser (1961)). 和訳 (米津・下郷): 工作機械の振動, コロナ社 (1968).
- 4) Advances in Machine Tool Design and Research (Proceedings of International M. T. D. R. Conference), Pergamon. 毎年会議ごとに発行.
- 5) International Journal of Machine Tool Design and Research (4回/年).
- 6) 竹中・伊藤・本田: 新編工作機械, 養賢堂 (1966).
- 7) 例えば 塩崎: 工作物の加工精度に及ぼす弾性変形の影響, 精密機械 **32** 1 (昭41); 機械と工具 **12** 3 (昭和43) 22. P.D. Singhal & H. Kaliszer: Proc. of MTDR (1965) 629.
- 8) 塩崎: 7)をみよ
- 9) PERE (Production Engg. Research Assoc., England) Report No. 27. または 2) の p.96.

