

〈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 8 回) 寸法の創成過程と加工精度

奥山繁樹 (防衛大名誉教授)

1. はじめに

機械部品の加工に研削が選ばれる主な理由は、切削が難しい材料でも能率的かつ高精度・高品質に仕上げることができる点にある。研削熟が仕上面の品質に及ぼす影響については前回のレクチャーで触れたが、機械部品の形状・寸法精度もまた、その品質を左右する重要な要因である。

円筒外面研削においては、工作物の剛性が低いことが多く、たわみが発生しやすい。研削システム全体の弾性変形も加わり、寸法の創成過程に大きな影響を及ぼす。このことに着目した岡村らは、いわゆる「かつぎ理論」を提唱して注目された。その後、工作物の熱変形と、これによる切り過ぎに着目した研究が進み、寸法の創成過程が明らかになってきた。

今回のレクチャーでは、寸法の創成過程に影響を及ぼす因子を概観することから始める。この中で、砥石と工作物の接触域で発生する「工作物の局部的熱変形」は筆者が見いだした因子であり、一般の認識が低いと思われるのでやや詳しく説明する。つぎに、円筒ブランチ研削における寸法の創成過程について考察した上で、寸法精度と形状精度の向上策について考える。

2. 寸法の創成に影響を及ぼす因子

寸法の創成に影響を及ぼす因子は、切り残しの原因になる因子と、切り過ぎの原因になる因子の二つに大別できる。前者には、以下の四つが考えられる。

(1) 砥石の摩耗による半径減： d_0

一般砥粒砥石の場合には、加工中に比較的大きな摩耗(砥石の半径減)が生じ、切り残しに繋がる。研削によって除去した工作物体積と砥石損耗体積の比は研削比と呼ばれる。例えば、焼入れ鋼を A 系砥石で研削したときの研削比は 5~50 程度であるが、cBN ホイール

を用いるとその値は数千に達する。このため、cBN ホイールで鋼を短時間加工するような場合には、摩耗による半径減を考慮しなくて良いこともある。

(2) 機械系全体の弾性変位による切り残し： d_1

砥石から研削盤本体を介して工作物に至る機械系全体の静剛性を K_m 、垂直研削抵抗(または、法線研削抵抗)を F_n とすると、弾性変位による切り残し d_1 は F_n/K_m で与えられる。なお、砥石の切込み送りにリニアモータを用いている場合には、サーボ剛性 K_S (外力に抗して位置の偏差をゼロにしようとする力と位置偏差との比)に応じた切り残し F_n/K_S を生ずるが、ここでは d_1 に含まれるものとする。

(3) 砥石と工作物の接触変位による切り残し： d_2

砥石も工作物も弾性体であり、しかも砥粒は砥石表面に弾性的に支持されているから、砥石と工作物の接触剛性 K_{con} に起因する切り残し $d_2 = F_n/K_{con}$ を生ずる。ただし、 K_{con} は一定値ではなく、 F_n が大きくなると急増する、つまり強い非線形性を有することに注意する必要がある。

(4) 砥粒切れ刃の塑性的上滑りによる切り残し： d_3

第 1 回目のレクチャーで述べたように、切れ刃と工作物が接触しても、工作物表面を掘り起こすだけで、すぐには切りくずを出さない。切りくずを出す直前における切れ刃と工作物の干渉深さが d_3 である。

一方、切り過ぎに関わる因子には、以下の三つが考えられる。

(5) 砥石と工作物の平均温度上昇に起因する熱膨張(両者の半径増)： δ_1

例えば、鋼の線膨張係数は 11×10^{-6} 程度であるから、 $\phi 100\text{mm}$ の工作物が 10°C 上昇すると、外径は約 $11\mu\text{m}$ 増加する。つまり、冷却後の工作物は $11\mu\text{m}$ の寸法不足が生ずることになる。

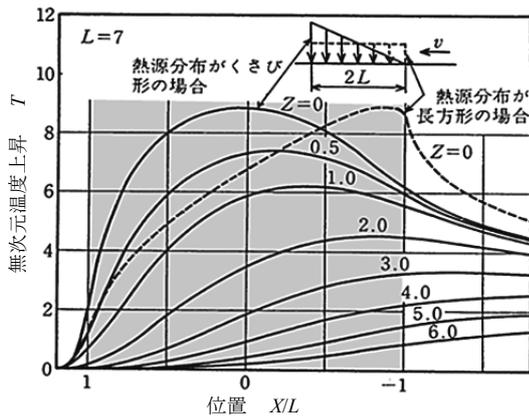


図1 ワンパス上向き研削における工作物表面の温度上昇

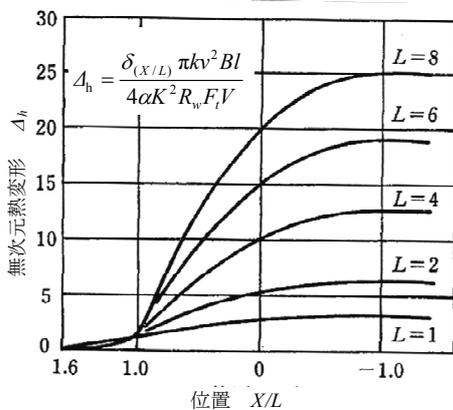


図2 工作物表面の無次元熱変形

(6) 矩形工作物の曲げ変形: δ_2

前回のレクチャーで紹介した、研削熱による矩形工作物の曲げ変形に起因する切り過ぎである。この因子は、仕上面の形状精度にも関わる重要な因子である。

(7) 工作物の局部的熱変形: δ_3

砥石と工作物の接触域で工作物表面は局部的に熱膨張するため、その分過剰に削り取られるが、その詳細については後述する。

これら七つの因子は、影響の大きさと方向がある程度予測できるから、誤差の補正は不可能ではない。一方、研削盤の振動や切込み送りの乱れなどは影響の仕方が不確かであり、補正は難しい。

3. 砥石と工作物の接触域における局部的熱変形

図1は、ワンパス上向き研削における工作物表面の温度分布を、筆者らが解析した結果である。ここで、 L : 砥石と工作物の無次元接触長さ(= $vl/4K$). v : 工作物速度, l : 砥石と工作物の接触長さ, K : 工作物の温度伝

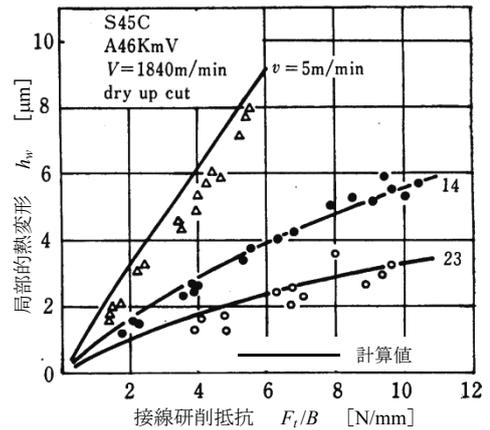


図3 工作物表面の局部的熱変形

導率), Z : 無次元深さ(= $z/2K$, z : 表面からの深さ), T : 無次元温度上昇[= $\theta \times \pi kv Bl / (2KR_w F_t V)$]. ここで, θ : 工作物表面の温度上昇, k : 工作物の熱伝導率, B : 工作物幅, R_w : 熱の工作物への流入割合, F_t : 接線研削抵抗, V : 砥石周速度]である。6回目のレクチャーで紹介した工作物表面温度の測定例と比べると、熱源の強度分布をくさび形(三角形)と仮定した方がより妥当と言える。

工作物表面の温度分布がわかれば、これを深さ方向に積分して線膨張係数 α をかければ、砥石と工作物の接触域の各位置(X/L)における、垂直方向の熱変形量 $\delta_{(X/L)}$ が得られる。図2は、図中に付記した無次元熱変形 Δh と位置 X/L との関係を示している。熱変形は熱源の後端で最大値 $\delta_{(X/L=-1.0)}$ に達するので、これを h_w' と書くと、次の関係が得られる。

$$h_w' = \alpha \frac{R_w F_t V K}{B k v} \tag{1}$$

さらに、工作物表面は水平面内にも熱膨張しようとするが、その下層部によって変形が拘束されるから、ポアソン比 ν の影響を受け、実際の上方向への熱変形 h_w は上式の $(1+\nu)/(1-\nu)$ 倍になる。

$$h_w = \frac{1+\nu}{1-\nu} h_w' \approx 1.8 h_w' \tag{3}$$

図3は、筆者が求めた h_w の計算値と測定値を比較したもので、両者はほぼ一致している。 h_w の値は、寸法の創成過程を考える上で無視できない大きさであるので、これを「局部的熱変形」と名付けた。

図4は、局部的熱変形を考慮した砥石と工作物の接触状態の模式図である(簡単のため、本図では局部的熱変形以外の因子を無視している)。工作物は、接触

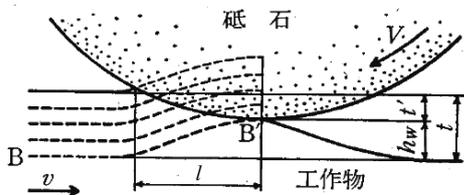


図4 局部的熱変形を考慮した、砥石と工作物の接触状態の模式図

域内で次第に盛り上がりながら砥石に削り取られるから、研削後の冷却に伴って収縮し、 h_w だけオーバカットされることになる。なお後述のように、局部的熱変形は仕上面の形状精度に影響を及ぼす因子でもある。

4. 寸法の創成過程と精度

4.1 寸法の創成過程

図5は円筒プランジ研削において、砥石を一定速度 V_p で切込んで、所定の寸法を得ようとした時の経過時間 τ と工作物半径減(寸法創成量)との関係を中島ら¹⁾が調べた結果である。この図では、切り過ぎに関わる因子が全て無視されており問題があるが、寸法の創成過程を理解する上で役立つので引用した。

砥粒切れ刃の上滑りのため、砥石が工作物に接触した瞬間には工作物の除去は始まらず、ある時間 τ_e 遅れる。その後、過渡状態が終了する時間 τ_t までの間は、工作物半径の減少速度 $dS_R/d\tau$ は砥石の切込み速度 V_p よりも小さいが、時間とともに V_p に近づき、定常状態では $dS_R/d\tau = V_p$ となる。定常状態でのある瞬間 N では、寸法の創成量 S_R は砥石の全切込み深さ $V_p\tau$ よりも $(d_0+d_1+d_2+d_3)$ だけ小さい。

点 N' で砥石の切込みを中止しても、工作物の除去作用は継続される。この状態をスパークアウト研削と言い、工作物半径は次第に減少するが、全切込み $V_p\tau$ に一致することはない。つまり、砥粒の最終的な上滑り時に発生する垂直研削抵抗 F_n に対応した切り残し d_f と最終的な砥石の摩耗量の和だけが切り残される。

実際には、図5に示した寸法の創成過程に、熱による切り過ぎの影響が加わるためにさらに複雑で、条件によっては全切り込み量以上に加工されることもある。

なお、平面プランジ研削における寸法の創成過程は断続的になるものの、本図に類似した経過をたどるから、上記の考え方は平面プランジ研削にも適用できる。

4.2 寸法精度の向上策

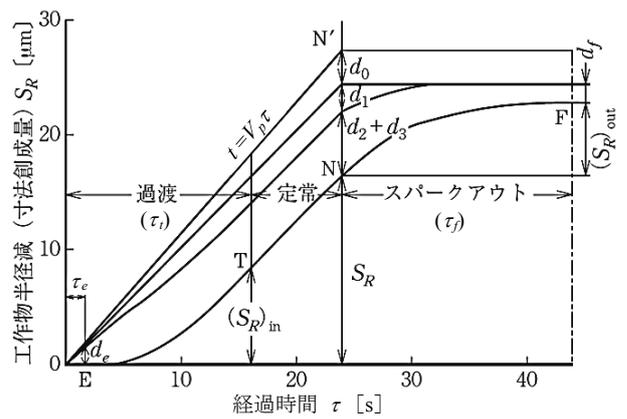


図5 円筒プランジ研削における経過時間と工作物半径減(寸法創成量)との関係 (WA60PV, $V=1800\text{m/s}$, 切込み速度 $V_p=1.14\mu\text{m/s}$)

上述のように寸法精度に影響を及ぼす因子は多く、これらの全てを把握してコントロールすることは難しい。とはいえ図5によれば、スパークアウト研削を丹念に行うことで、砥石損耗以外の因子の影響を最小限にできる。この間、研削液を適切に供給すれば熱変形の影響も抑制できよう。

製造現場では、研削終了直前における砥石の作用面レベルを把握することが重要である。平面研削においては、テーブルの近くに設置したドレッサでドレッシングを行い、そのときの砥石作用面レベルを基準に最終的な切込み量を決めることが行われる。また、砥石頭に接触あるいは非接触の位置センサを取り付け、あらかじめ準備した基準面と被削面とのレベル差を測定して、最終切込み量を決定することも行われる。

一方、円筒研削においては研削中あるいは研削を中断して工作物径を測定し、目標値に追い込むことが行われる。いずれにしても工作物寸法を機上測定する場合には、その温度が規定された値でかつ安定している必要がある。

5. 形状精度(平面度)の向上策

研削加工は、強制切込み加工の一種であり、基本的に運動転写によって仕上面が創成される。したがって、工作物の送り運動精度が十分高いことが基本であるが、運動精度に関する議論は別途行うこととして、ここでは一般の精密平面研削盤より高精度に平面を創成しようとする場合の課題と対策について述べる。

第2章で寸法の創成過程に影響を及ぼす因子を列

挙げたが、各因子の影響の度合いが工作物の位置によって変わらなければ、平面度を悪化させることはない。

しかし、局部的熱変形の量は工作物表面での変形の拘束の度合いに依存するから、工作物の自由端に近づくほど熱変形量は減少する。結果、板状工作物の端面をプランジ研削すると、**図 6**に

示すように凹状に仕上がることになる。ディスク状工作物の端面を円筒プランジ研削した場合も同様である。また、**図 7**に示す板状工作物の曲げ変形については、前回のレクチャーで紹介したとおりで、仕上面の平面度を著しく悪化させる。これらの影響を抑制するには、努めて切れ味の良い砥石を用い、切込みを小さくするとともに、研削液を適切に供給する必要がある。

一方、平面プランジ研削において砥石が工作物の端部を通過するとき、砥石と工作物の接触長さが変化するから垂直研削抵抗が急変し、**図 8**に示すようなダレが発生する。特に出口側でダレが大きくなるのは、垂直研削抵抗が急に無くなったとき、砥石が下方にオーバシュートするためである。このようなダレによる平面度の低下を防ぐには、剛性の高い研削盤に結合度が高く、切れ味の良い砥石を適用して、ごく微細な切込みで研削する必要がある。

なお円筒トラバース研削では、砥石が工作物端を通り抜けるときにダレが発生して、円筒度が低下することが知られている。これを防ぐには、工作物の端部を砥石が通り抜ける前にトラバース方向を反転させる必要がある。反転のタイミングは、砥石と工作物の接触幅が砥石幅の 2/3 程度になったときが良いとされている。

一方、筆者らは研削に伴う工作物表面の塑性流動がその自由端近傍で拡大して、研削バリが発生・成長することを見出した。**図 9**にバリの一例を示す。図(a)では、切れ刃は右方向に切削しており、横バリ(手前側)と出口バリ(右側)が生じている。図(b)では、切れ刃は右手前から進入しており、端部に入口バリ(いわゆるポアソンバリ)が生じている。バリは部品の機能・性能に悪影響を及ぼすばかりでなく、工作物端部の平面度も悪化させる。バリの原因は、工作物表面の塑性流動である

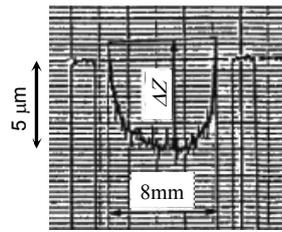


図 6 板状工作物の幅方向の仕上面形状 (A46M7V, S45C 焼入れ材, 幅 $B:8\text{mm}$, $t=14\mu\text{m}$, $V=1800\text{m/min}$, $v=10\text{m/min}$)

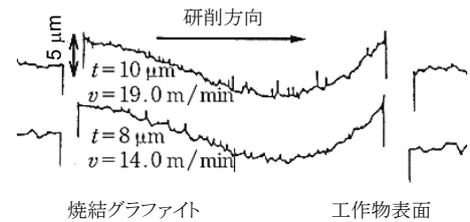


図 7 両端中央を支持した矩形工作物の仕上面形状 (A80M6V, S45C 焼入れ材, 工作物高さ $H:20\text{mm}$, 長さ $L:80\text{mm}$, 幅 $B:8\text{mm}$, $V=1800\text{m/min}$)

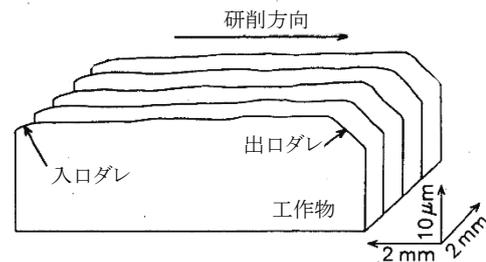
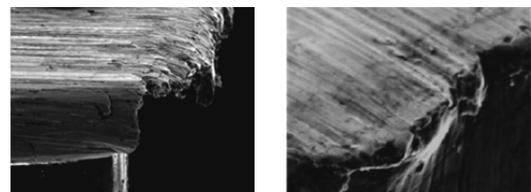


図 8 工作物の両端部を砥石が通過するとき発生するダレ (湿式ワンプラス研削, WA120K8V, S45C 焼入れ材, $t=15\mu\text{m}$, $V=1260\text{m/min}$, $v=19\text{m/min}$)



(a) 横バリと出口バリ (b) 入口バリ

図 9 工作物の外周部に発生するバリ (S45C 生材)

から、これを抑制するには、切れ味の良い微粒砥石を用い、ごく微細な切込みで研削する必要があるが、工作物表面の塑性流動を完全に無くすことはできない。

6. おわりに

仕上面の品質と形状・寸法精度をさらに向上させるには、幾何学的な砥石と工作物の作動条件を改善するだけでは不十分であり、研削盤の剛性と運動精度を極限まで向上させるとともに、砥粒切れ刃の密度と切削性能を格段に高める必要がある。これらを追求したのが超精密研削技術であるが、これについては追って触れる。

7. 参考文献

- 1) 中島, 岡村, 木下: 精密機械, 40, 3, (1974) 256.