

加工プロセスと工作機械の相互作用

稲崎一郎

Interaction between the material removal process and the machine tool

Ichiro Inasaki

Abstract: In order to enhance the performance of machining processes it is important to understand the interaction between the process and the machine tool. In this paper, the time constant of grinding process is derived to evaluate the performance of cylindrical grinding process.

Keywords : Machine tools, Machining process, Interaction

1. はじめに

切削，研削に代表される除去加工プロセスにおいて，プロセスと工作機械は力，熱，変形を介在として閉じた回路を構成している．この様な加工システムの挙動を高性能化するには，両構成要素の相互作用のモデル化が必要である．ここでは，円筒研削加工における相互作用を決定する時定数を導出し，これによって研削砥石の切れ味を評価することが可能となることを示す．

2. 静的な相互作用

円筒プランジ研削を図 1 に示したようにモデル化する．砥石台の送り量を x ，工作物の半径減少量を r ，研削抵抗の法線方向成分によって生ずる機械系の弾性変形量を y とすると，

$$r = x - y \quad (1)$$

なる関係が成立する．機械系の静剛性を k とすると，

$$y = \frac{F_n}{k} \quad (2)$$

ただし， F_n は法線方向研削抵抗である．式(2)は外力（機械系への入力）と変形量（機械系からの出

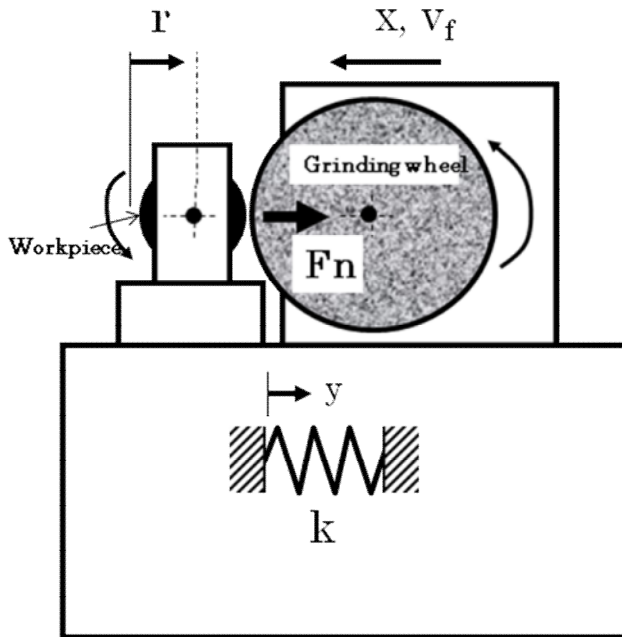


Figure1. Cylindrical grinding process

力) の関係を与えているが、機械系の静的な挙動を与えるモデル式として重要である．すなわち、 $1/k$ は静的コンプライアンスで、機械系の伝達関数と考える事ができる．

砥石台の切り込み速度を v_f とすると、時間を t として

$$x = v_f t \quad (3)$$

であるから、

$$r + \frac{F_n}{k} = v_f t \quad (4)$$

となる．

ここで、研削動力が単位時間あたりの材料除去量 ($Q = b\pi d_w \frac{dr}{dt}$)，すなわち研削率に比例すると仮

定し、 F_t を接線方向研削抵抗、 b を研削幅、 d_w を工作物の直径、 V を砥石周速度、 γ を比例定数とすると、

$$F_t V = \gamma b \pi d_w \frac{dr}{dt} \quad (5)$$

よって静的な法線方向研削抵抗を与える式として

$$F_n = \gamma^* b \pi d_w \frac{1}{V} \frac{dr}{dt} \quad (6)$$

を得る． 但し， γ^* は，接線方向研削抵抗と法線方向研削抵抗の比 $\gamma^* = F_n / F_t$ である． 式（６）は研削プロセスのモデル式とみなせる． 以上の関係から，

$$r + \frac{\gamma^* b \pi d_w}{k} \frac{1}{V} \frac{dr}{dt} = v_f t \quad (7)$$

なる微分方程式が得られ，円筒プランジ研削は１次遅れ系と近似されることがわかる． 式（７）の解は，

$$r(t) = v_f t - v_f T (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (8)$$

となる． T は１次遅れ系の時定数で，

$$T = \frac{\gamma^* b \pi d_w}{k V} \quad (9)$$

で与えられる．

式（９）は，図２のように時定数をパラメータとして研削時間に対して描かれる． ただしこの図において，研削サイクルは一定の砥石切り込み速度と，切り込み運動を停止した後のスパークアウト研削とから構成されているとしている． 図中の実線は砥石台の動きを示し，点線は実際の工作物半径減少量を示している． 点線の傾きは実際の工作物半径減少速度であり，定常状態以外では砥石切り込み速度とは一致していない． 半径減少速度は，研削開始時から次第に上昇し，定常状態に至ると砥石切り込み速度と一致する． 砥石切り込みが停止してスパークアウト研削に入ると，半径減少速度は次第に低下し速度ゼロに漸近する． このような時間遅れは，時定数の増大，すなわち機械系の剛性の低下によって促進される（式（９））． 一方，砥石周速度を上昇させることによって研削時定数を減少させることができ，高速研削の特長を生かす事ができる．

図２から，機械系の剛性が低いとスパークアウト研削に要する時間が長くなることがまず指摘される． また，もしもスパークアウト研削を行わないで一定時間後に研削を終了する場合を想定すると，時定数が大きいほど，すなわち機械系の剛性が低いほど寸法誤差が大きくなる． すなわち切り残し量が増大する． 更に，研削終了時における実際の工作物半径減少速度が異なることは，仕上げ面粗さにも違いを生じさせるであろう．

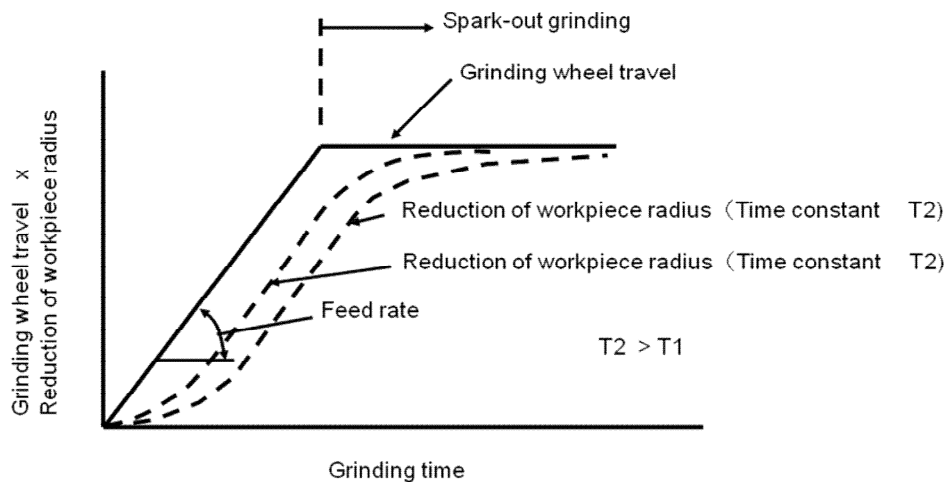


Figure2. Grinding process as a first order time delay system

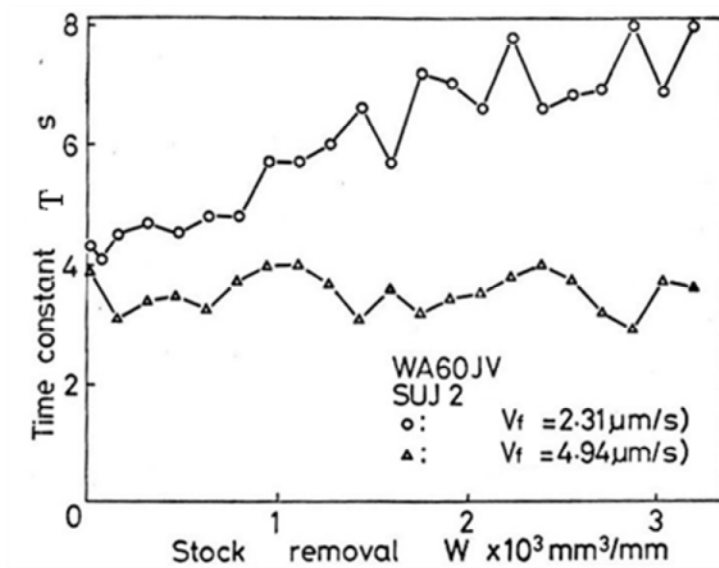


Figure 3. Influence of grinding time on the time constant

実際の研削においては、時間の経過に伴って砥石の切れ味が変化し、定数 γ^* が変化する。これは時定数の変化を引き起こし、研削結果に影響を及ぼす。以上述べたように、研削プロセスの時定数は極力小さいことが望ましい。そのためには、機械系の静剛性を大きく保つことが必要である。研削時定数は、式(9)から明らかなようにプロセスと機械剛性の相互作用で決定される。

3. 砥石切れ味の評価

式(5)における γ は砥石の切れ味を代表しており、式(9)で表わされる研削定数は研削盤とプロセスの相互作用を考慮した砥石の切れ味評価に有効なパラメータである。研削時間の経過に伴う砥石切れ味劣化の指標、すなわち寿命判定基準として有用である。図3は、研削時間による時定数の変化を測定した例である。砥石切込み速度が比較的遅い場合は砥粒切れ刃の摩滅的摩耗が主となるため、切れ味が劣化して時定数は次第に増加する。一方、切込み速度が速い場合は自生発刃作用が促進されて時定数の増大は少ない。砥石寿命の判定基準として有用であることが示されている。

4. 結言

研削プロセスと研削盤の相互作用を考慮して導出された研削時定数が、砥石の切れ味評価指標として有用であることを示した。

5. 謝辞

本研究は、平成22年度中部大学総合工学研究所研究補助金の助成を得たものである。ここに記して謝意を表する。