

研削プロセスの高性能化 —プロセスと研削盤の相互作用—

Performance Enhancement of Grinding Processes

— Mutual Interaction between the Material Removal Process and the Machine Tool —



稲崎一郎*

Prof. Ichiro INASAKI

In order to attain the performance enhancement of grinding processes in terms of the high productivity as well as high machining accuracy, it is necessary to establish the reliable physical models of the material removal process and the machine tool performance. In addition to those, it is essential to understand their static and dynamic mutual interactions.

Key Words: grinding process, grinding machine, mutual interaction, stiffness, chatter vibration

1. 序言：研削加工プロセスの特質

研削加工は、高硬度の微細砥粒を切れ刃として材料除去を行うプロセスで、生成する切屑が切削加工に比べてはるかに小さいために、高精度、高品質表面が要求される難削材料部品の加工においてその特徴を最大限に発揮する。今日でも、他の方法では置き換えられない適用場面が数多くある重要な除去加工プロセスである。

研削盤によって実行される材料除去プロセスが、他の切削工作機械によるものと異なる点が幾つかある。まず図1に示したように、工具として使用される研削砥石は、その形状と作業面の切れ刃分布が研削盤上で調整される。すなわち、研削盤は研削プロセスのみならず、これら調整作業（ツールイーグ、ドレッシング）をも高性能に実行できなくてはならない。CBN及びダイヤモンド砥粒で代表される超砥粒ホイールを使用する場合は、砥石が従来のものに比べて著しく強固なため、その調整作業が難しい。調整作業の良し悪しは、これに続いて行われる研削作業の結果に大きく影響する。砥石と調整用具の間の高精度な相対運動と、特に調整工具系の高い剛性が必要である。

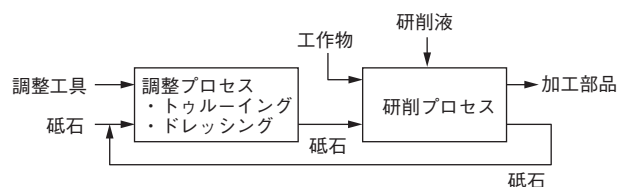


図1 調整プロセスと研削プロセス
Dressing process and grinding process

次に、工具として使用する砥石の弾性体としての挙動が、加工結果にもたらす影響が大きいことを念頭に置かなければならない。すなわち、研削抵抗による結合材の弾性変形が、切削工具と違って材料除去プロセスに無視することができないほどの影響を持ってくるのである。

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、図2に示したように力、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、両構成要素の特質と相互作用をよく理解することが肝要である。本稿では、「力と変形を通してのプロセスと機械の相互作用」という切り口から研削加工プロセスの高性能化に向けての指針を纏める。

*中部大学教授 総合工学研究所所長

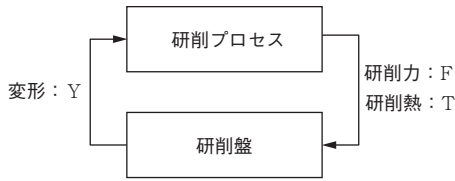


図2 閉回路系としての研削加工プロセス
Grinding process as a closed loop system

2. 静的な相互作用

高い加工精度と高能率加工を達成する上で、静的な剛性を高めることは必須の要件である。静剛性が何故高くなければならぬかを円筒プランジ研削を例にとって以下に説明しよう。図3に示したように、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、

$$r = x - y \tag{1}$$

なる関係が成立する。機械系の静剛性を k とすると、

$$y = \frac{F_n}{k} \tag{2}$$

ただし、 F_n は法線方向研削抵抗である。式(2)は簡単な外力（機械系への入力）と変形量（機械系からの出力）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と呼ばれ、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

$$x = v_f t \tag{3}$$

であるから、

$$r + \frac{F_n}{k} = v_f t \tag{4}$$

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、

$$F_t V = \gamma b \pi d_w \frac{dr}{dt} \tag{5}$$

よって静的な法線方向研削抵抗を与える式として

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

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、

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

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、

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

となる。 T は1次遅れ系の時定数で、

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

与えられる。

式(9)は、図4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。

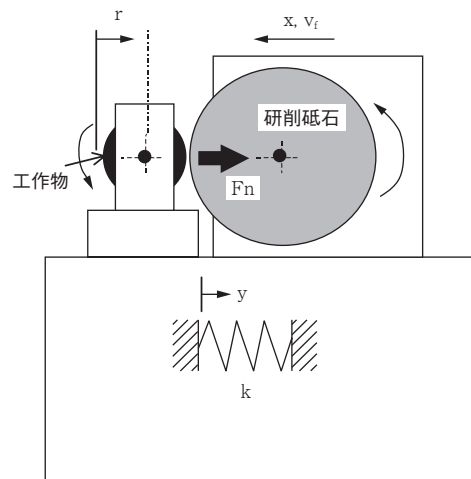


図3 研削盤の弾性変形モデル
Elastic deformation model of grinding machine

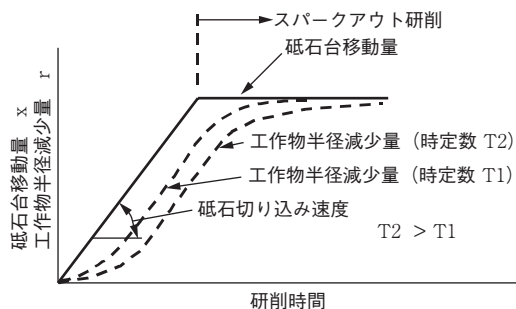


図4 1次遅れ系としての研削プロセスモデル
Grinding process as a first order time delay system

図4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。

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なのである。研削時定数は、式(9)から明らかのようにプロセスと機械剛性の相互作用で決定されるのである。

機械系の剛性は、研削盤を構成している各要素の弾性変形、案内面や軸受を含めた結合部での変形とがたによって決定される。その様子は図5のようにモデル化される。問題となるのは、研削抵抗が伝達される経路内に存在する構成要素である。研削盤の総合剛性 k_r が各要素、各結合部の剛性の直列結合で近似されるとすると次式が成立する。

$$\frac{1}{k_r} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (10)$$

式(10)は2つの重要なことを示唆している。すなわちその第一は、総合剛性を高めるために、研削抵抗が伝達される経路(力の流れ)をなるべく短くすることである。第二は、各構成と結合部の剛性にバランスを持たせ、一箇所でも極度に剛性の小さな部分を設けないことである。式(10)から明らかのように、総合剛性に及ぼす影響は、剛性の小さな部所が最も著しいからである。

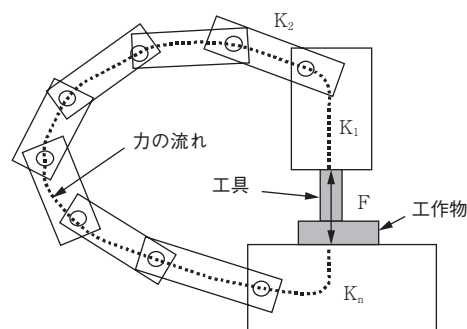


図5 工作機械内の力の流れと総合剛性
Force flow in the machine tool and the resultant stiffness

研削加工の場合には、使用する砥石の弾性変形も無視することができない。工作物との接触部は研削抵抗によって変形するのであるから、式(9)の中には砥石の接触剛性¹⁾も考慮しなければならない。図6は砥石作業面の接触剛性を測定した結果である。変形が増大するほど剛性が高まる非線形特性を持っている。

剛性を議論するにあたって、研削抵抗と変形の方向を考えることが重要である。加工誤差に影響を与えるのは、加工面に垂直な方向の変形である。従って、この方向の剛性を高めることが特に重要となる。

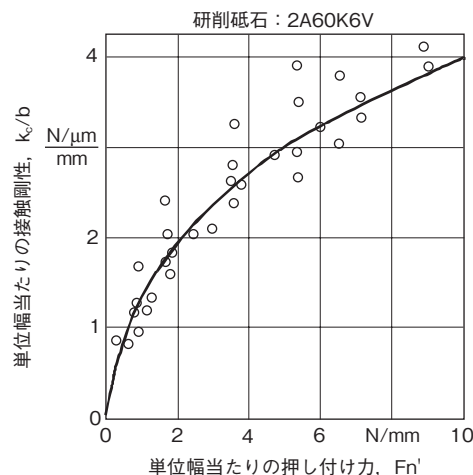


図6 研削砥石の接触剛性
Contact stiffness of the grinding wheel

3. 動的な相互作用

加工精度と能率を高めるために、研削盤は加工中に振動すなわちびびりを発生してはならない。振動による加工面の形状劣化や粗さの劣化は、切削の場合よりも深刻な問題となる。

研削加工中に発生する振動は、その原因によって2つ

に分類される。強制振動と自励振動である(図7)。強制振動は、機械構造物を強制的に励振する振動源が存在する場合の振動であり、研削盤の場合には砥石の不均衡によるものが最も問題となる。内面研削盤を例外として、研削砥石はその質量が大きく、かつ回転数も高いので不均衡による励振力は他の工作機械に比べて著しく大きい。従って、砥石主軸系の動剛性を大きくし、強制振動の振幅を小さくすることがとりわけ重要である。強制励振力 F によって発生する振動の振幅 y は励振周波数の関数であるが、励振周波数が機械系の固有振動数と一致する共振時において最も大きく、その値は

$$\frac{y}{F} = \frac{1}{2k\zeta} \quad (11)$$

で与えられる。ここで ζ は減衰比である。動的な剛性を高めるには、構造物の静剛性 k だけでなく、減衰性を高めることも同様に重要である。

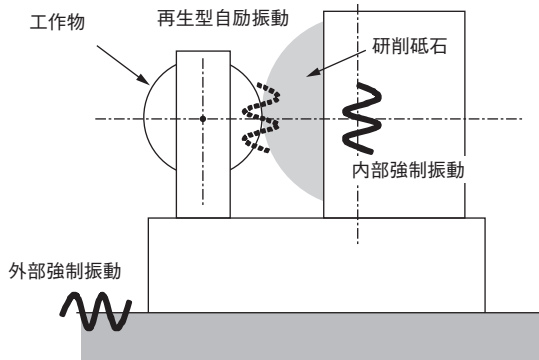


図7 研削加工における振動現象(1)

Vibration phenomena in the grinding process (1)

第2の振動原因は、再生効果による自励振動である。その理論的背景の詳細²⁾にはここでは触れないが、時間遅れ現象に基づく不安定振動である。砥石と工作物間に何らかの原因によって相対変位が生じたとすると、その影響は工作物表面に周期的なうねりとなって残される。この表面は工作物一回転後に再び砥石で研削されるが、この時切り込み深さの変化として影響する。このように、一回転前の振動が影響することによって生ずる不安定振動を、再生効果による自励振動と呼んでいる。これは切削加工においてももちろん問題となるのであるが、研削加工の場合は、工具である砥石表面にも振動によって周期的なうねりが摩耗によって生ずる可能性がある。すなわち再生効果が砥石表面にも存在するために、振動現象は非常に複雑となる(図8)。

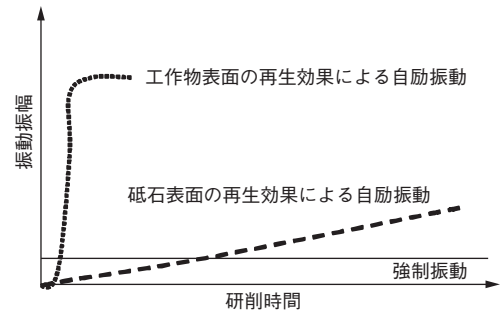


図8 研削加工における振動現象(2)

Vibration phenomena in the grinding process (2)

研削における再生型自励振動現象の概略は次のように要約される。

- (1) 工作物外周の再生効果による自励振動はその発達速度が速く、このような条件の下では加工を遂行することができない。このタイプの自励振動は工作物周速度が高い時に発生する。
- (2) 一方、工作物周速度を下げると工作物表面の再生効果による自励振動は抑制されるが、砥石作業面の再生効果による自励振動が発生するようになる。このタイプの振動はその発達速度が遅いが、殆どの研削条件が実は不安定領域に存在することが理論的に示されている²⁾。すなわち、次第に発達する振動の振幅が許容値に達した時点で砥石表面を調整(トゥルーイング、ドレッシング)しなければならず、砥石寿命の判定基準となる。振動の発達足を抑えて寿命時間を長くする研削条件の選択が必要となる。

2つの再生効果が工作物周速度の影響を強く受ける理由は、図9に示した砥石と工作物の幾何学的干渉作用によることと考えることができる。すなわち、振動数と振幅を一定として、工作物周速度だけを次第に減少させると、相対振動によって工作物表面のうねり振幅は幾何学的干渉効果によって次第に減少し、再生効果が薄れてくると考えることができる。この様な干渉効果は砥石外周においても存在するはずであるが、その周速度が工作物に比べて著しく高いために通常の条件下では無視することができる。

再生効果による自励振動の安定性は、図10に示した研削盤動コンプライアンスのベクトル軌跡線図によってその概略を議論することができる。同図において、原点から曲線までの距離は加振力に対する機械系の振幅応答を、横軸からの角度は両者の位相差を意味している。すなわち、ベクトル軌跡線図を用いれば、一本の曲線で機械系の振動特性を完全に記述することができる。また、

曲線の横軸成分は応答特性の実数部を、縦軸成分は虚数部を示していることにもなる。縦軸との切片は位相差が90°であるから、共振時の応答を示している。

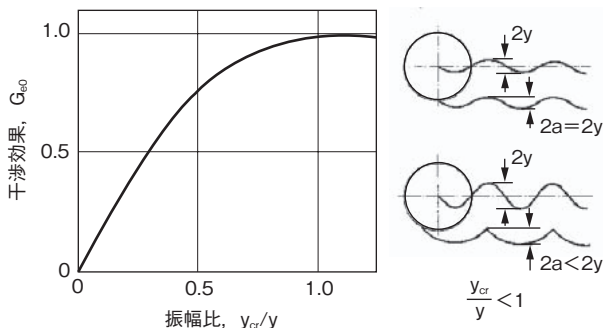


図9 幾何学的干渉作用

Geometric interference between the grinding wheel and the workpiece

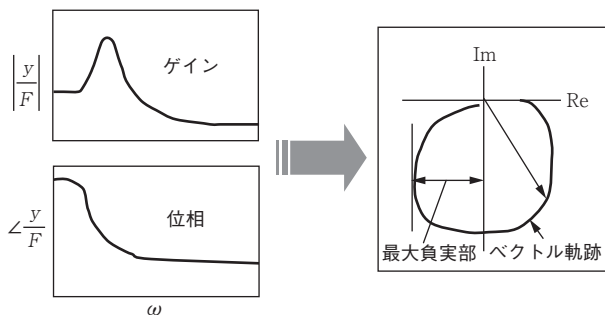


図10 動コンプライアンスのベクトル軌跡
Vector locus of dynamic compliance

理論背景の詳細は省略するが、再生効果による自励振動の安定性はベクトル軌跡の最大負実部の大きさ、すなわち横軸の負の側にどれ程突出しているかによって決定される。左側への突出量が小さい研削盤ほど動的安定性が良い機械と言える。機械系の動コンプライアンス、あるいは動的な伝達関数、すなわちベクトル軌跡は一般に

$$\frac{y}{F} = \frac{u}{k} [\operatorname{Re}G(j\omega) + j\operatorname{Im}G(j\omega)] \quad (12)$$

ただし

$$u = \cos\alpha \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad (13)$$

で与えられる。ここで、 u は方位係数と呼ばれる係数で、 α は加工面法線方向に対する構造物の固有振動モードの方向を、 β は加工面法線方向に対する加振力の方向を意味している。すなわち、方位係数は β 方向に作用する励振力によって引き起こされる構造物の固有振動モードの、加工面法線方向成分を求めるための係数である。式(12)から明らかのように、方位係数が小さいほど機械

系動特性の最大負実部の大きさは小さく、自励振動に対する安定性は増加する。その効果は、静剛性と同程度である。従って、安定性の高い研削盤を設計するにあたっては、その固有振動モードの方向には十分な配慮が必要である(図11)。動的な相互作用を議論するうえで、機械構造系のモデル式(12)を知る事が重要である。

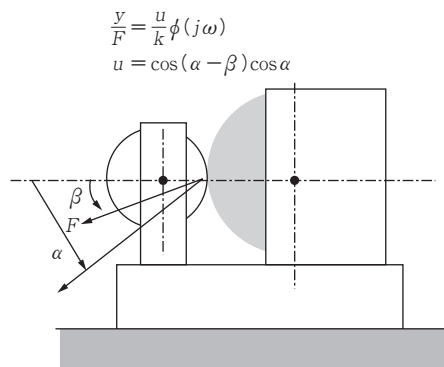


図11 方位係数の意味
Directional factor

研削プロセスの安定性を議論する上で、動的な研削抵抗に関するモデル式が必要となる。すなわち、切り込み深さ方向に相対振動をしながら材料除去を行う際の研削プロセスの応答(砥石と工作物間の相対振動振幅を入力とし、変動する研削抵抗を出力とする応答)を知る必要がある。ここではその詳細は述べないが、理論的な解析結果は相対振動の速度に比例する項も存在する事を示唆している²⁾。砥石と工作物が面接触をしている事がその理由である。振動速度に比例する力は減衰力を意味しており、研削プロセス内には安定性を高める効果が内在していることになる。

動的研削加工プロセスを考える上で、使用する砥石の弾性変形特性、すなわち工作物との接触部における接触剛性の影響も重要である。接触剛性が低い低結合度砥石の方が安定性は高いが、そのような砥石は通常摩耗が進行し易く、砥石作業面の再生効果による自励振動が発達し易くなる。このように、工具として使用する砥石の性質は研削プロセスの安定性に複雑な影響を与える。

4. 動的安定性の向上対策

自励振動の発生は加工精度のみならず、加工能率の低下も招くために、高性能研削を達成する上でその抑制は必須である。プロセスと研削盤の挙動、更にこれらの相互作用を考えることによって、振動の抑制対策を立てる

ことが可能となる。

図12はその考え方を示したものである³⁾。虚軸に平行で負実部に引かれている直線は研削プロセスを示しており、たとえば式(5)における γ や b が増加すると虚軸に近づく。ベクトル軌跡は前節ですでに述べたように研削盤の振動特性を示している。安定性解析の結果は、直線とベクトル軌跡が交点を持つようになると加工系は不安定になって自励振動が発生することを示している。従って、振動の抑制対策は両者が交差しないようにすることである。具体的には以下の対策が導出される。

- (a)虚軸に平行な直線が左方に移動するように研削条件を変更する。しかし、これは多くの場合、加工能率を下げる結果になる。
 - (b)研削盤の静剛性 k の増大、あるいは方位係数 u の減少によってベクトル軌跡の最大負実部の突出量を小さくする。
 - (c)研削盤の減衰比 ζ を増大する。
 - (d)ベクトル軌跡全体を右方向に移動させる。これは具体的には接触剛性が低い低結合度の砥石を使用することによってある程度達成される。
 - (e)再生効果を攪乱する。工作物あるいは砥石表面の再生効果の位相が一定値にならないように、それぞれの回転数を細かく変動させることによって実現される。
- 材料除去のプロセスと工作機械の挙動を把握し、その相互作用を考えることによって筋道を立てて振動の抑制対策を考えることができるのである。

5. 結言

高精度、高能率研削を達成するための指針を得るにあたって、プロセスと機械それぞれの挙動をよく把握し、これに立脚して両者の相互作用を理解することが重要であることを指摘した。プロセスに関しては、まず加工条件によって研削抵抗がどのように変化するかを表す物理モデルを求めること、そして研削盤に関しては静的、動的外力に対する変形応答を求めることである。

参考文献

- 1) I. Inasaki: Ratterschwingungen beim Aussenrund-Einsteichschleifen, Werk und Betrieb, vol. 108, no. 6 (1975)341-346.
- 2) I. Inasaki: Selbsterregte Ratterschwingungen beim Schleifen, Methoden zur ihrer Unterdrueckung, Werk und Betrieb, vol. 110, no. 8(1977)521-524.
- 3) I. Inasaki, B. Karpuschewski, H. S. Lee: Grinding Chatter-Origin and Suppression, Annals of the CIRP, vol. 50, no. 2(2001)515-534 Keynote paper.

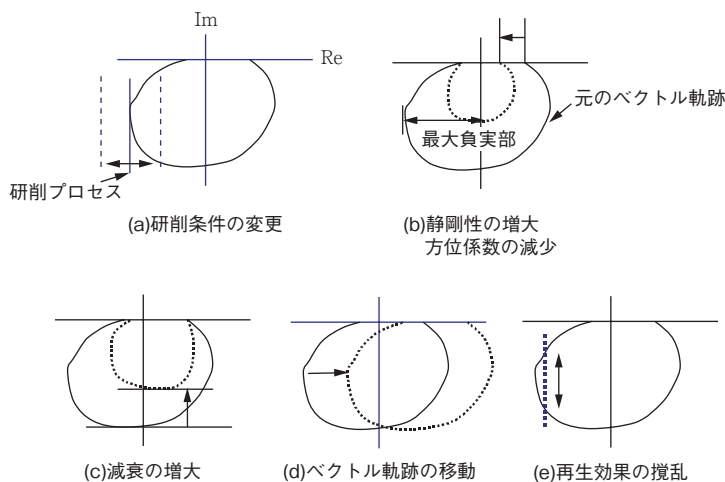


図12 再生型自励振動の抑制戦略

Strategies for suppressing the regenerative chatter vibration