

〈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 10 回) びびり振動の原因とその抑制

奥山繁樹 (防衛大名誉教授)

1. はじめに

砥石と工作物の間に相対振動が発生すると、加工面にうねりが生じてその品質を低下させるばかりでなく、加工の能率やコストにも影響する。

表 1 に、研削加工で発生しやすいびびり振動の形態とその原因を示す。びびり振動は、①床面などを介して伝わる外部振動、②研削盤の駆動系や油圧装置による内部振動、③砥石の偏心や不平衡、などに起因する「強制びびり振動」と、砥石と工作物の干渉作用を通じて発生・拡大する「自励びびり振動」に大別できる。

強制びびり振動のうち①～③については、びびり振動の周期を観察することで原因が特定できることが多く、対策も講じやすい。①によるびびり振動を抑制するには、工作機械を独立基礎の上に据え付けて振動を遮断する必要がある。また、機械のマウントに免震効果の高い材料を用いることで、外部振動の影響を抑制できる。②については、駆動系(モーター、ギアなど)の振動や油圧の脈動を抑制する必要がある。また、③の砥石軸に取り付けた砥石の偏心は、適切なツルーイングによって、不平衡は動バランスを精密に調整することによって抑制できる。①～③のいずれにおいても、砥石または工作物支持系の固有振動数、あるいは砥石から工作物に至る機械系全体の固有振動数と加振周波数とを離すことが肝要である。

なお、④の砥粒密度の偏りなどによる研削剛性(垂直研削抵抗 F_n と除去深さの比)の不均一と結合度の偏りなどによる接触剛性 (F_n と接触変位の比)の不均一は「自励びびり」の原因に分類される場合もあるが、振動の原因が当初から工具に内在していることから、ここでは「強制びびり」の範疇に入れた。なお、作業者が砥粒密度や結合度の不均一を修正することは困難であり、砥石を交換するほかない。

表 1 研削におけるびびり振動の形態と原因

びびり振動	強制びびり (周期的外力)	①床面から伝わる外部振動 ②研削盤内部で生ずる振動 ③砥石の偏心, 不平衡 ④研削剛性・接触剛性の不均一
	自励びびり	⑤再生びびり (前工程のうねりの再生効果) (砥石表面のうねりの再生効果) ⑥系の不安定性に起因するびびり

「自励びびり」には、⑤再生びびり(前工程で生じた加工面のうねりによって励起されるびびりと、砥石の摩耗に伴ってその表面に形成されたうねりが継続・拡大し、これが加工面に転写されるもの)と、⑥研削系の不安定性に起因するものがある。いずれにせよ、研削開始当初は安定的に加工できても、研削作業を続けると砥石は次第に摩耗して研削抵抗が増加する。このとき、砥石の摩耗、目詰まり、そして砥粒の脱落が砥石外周で均一である保証はなく、振動の原因になりやすい。

以上、研削に特有なびびりの原因と対策について概観したが、自励振動を理解するには、振動制御や系の安定性に関する知識が不可欠である。筆者は、この分野の経験が少ないことから、本稿の執筆にあたっては塩崎・宮下¹⁾、米津・稲崎²⁾、李³⁾ および稲崎⁴⁾の業績を参考にさせて頂いた。さらなる学習を希望する読者には、これらの文献を参照して頂きたい。

2. 振動の解析と系の安定性

2.1 砥石に不平衡がある場合の振動

いま、研削加工系を図 1 に示すごく単純化した 1 自由度の振動系で表せるものと仮定する。砥石と工作物の接触剛性を無視すると、砥石軸まわりの不平衡量が

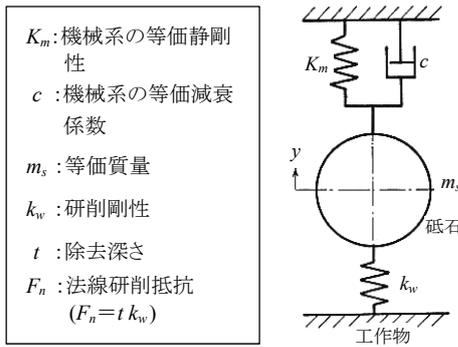


図1 加工系のごく単純化した振動モデル

$M(\text{N}\cdot\mu\text{m})$, 回転速度が $\omega(\text{rad/s})$ である砥石の, 工作物に垂直な方向の運動方程式は, 次式で与えられる.

$$m_s \ddot{y} + c \dot{y} + (K_m + k_w)y = M\omega^2 \quad (1)$$

ここで, y は砥石軸の垂直変位(μm), m_s は砥石を含む振動部の等価質量(kg), c は機械系の等価減衰係数($\text{N}\cdot\text{s}/\mu\text{m}$), K_m は機械系の等価静剛性($\text{N}/\mu\text{m}$), k_w は研削剛性($\text{N}/\mu\text{m}$)である.

このとき, 共振周波数 ω_n , 減衰比 ξ , 周波数比 u , および研削剛性と等価剛性の比 Γ は, 次式で与えられる.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_m}{m_s}}, \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{m_s K_m}}, \quad u = \frac{\omega}{\omega_n}, \quad \Gamma = \frac{k_w}{K_m} \quad (2)$$

角速度 ω で砥石を回転させたとき, 砥石の不均衡 $M(\text{N}\cdot\mu\text{m})$ に起因する砥石軸の振動振幅 Y_M は次式で与えられ, 実験結果にはほぼ一致することが稲崎ら⁴⁾によって確かめられている

$$Y_M = \frac{M\omega^2 / K_m}{\sqrt{(1-\Gamma-u^2)^2 + (2\xi u)^2}} \quad (3)$$

上式は, 砥石軸の回転速度が増加すると振幅が急増すること, 研削盤の等価静剛性や減衰比が増加すると振幅が減少すること, などを示している.

一方, 砥石軸が振動したとき, 砥石と工作物の相対振動がそのまま仕上面に転写されるわけではない. 砥石半径を R , 工作物速度を v , 臨界速度を v_c とすると,

$$\frac{v}{v_c} = \frac{v}{\sqrt{Y_M R} \times \omega} \quad (4)$$

の値によって, 仕上面のうねり形状が変化することが知られている. すなわち, v/v_c の値が1より大きい場合には砥石軸の振動振幅とうねりの振幅は一致するが, v/v_c が1より小さくなると, うねりの頂部が左右から削り取られてとがった形状になり(尖点が生じ), さらに v/v_c が減少するとうねりの振幅は急減する.

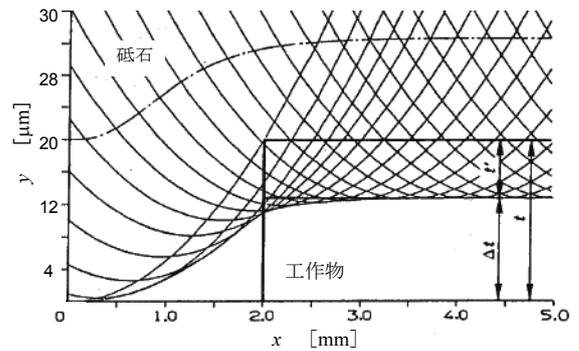


図2 砥石が工作物端と干渉したときの運動

なお, 砥石が偏心している場合も上記に準じたプロセスで振動振幅を解析できるが, 砥石の偏心は偏荷重に比べ, 激しいびびりに繋がりがやすい⁴⁾.

2.2 研削粘性とその効果

図1に示した振動モデルには, 等価減衰係数 c が導入されている. 機械構造物には, 振動を減衰させるヒステリシス・ロスがあり, さらに外周の粘性流体(空気や研削液)を巻き込むことで減衰作用が増大する.

一方, 研削加工においては, 幾何学的な砥石と工作物の干渉プロセスに減衰因子が内包されている. 図2は, 図1に示した研削モデルにおいて, 共振周波数 $\omega_n = 518\text{rad/s}$, 等価質量 $m_s = 52.1\text{kg}$, 等価減衰係数 $c = 4.39\text{N}\cdot\text{s}/\mu\text{m}$, 等価静剛性 $K_m = 14.0\text{kN}/\mu\text{m}$, 研削剛性 $k_w = 25\text{kN}/\mu\text{m}$ (いずれも筆者の測定値)を用い, 設定切込み $20\mu\text{m}$ で右方向に研削したときの砥石軸の運動軌跡(図中の一点鎖線と並進)と砥石外周面(実線)が変位する様子を示している.

このシミュレーションでは, 微小時間に新たに砥石と干渉した工作物断面積に比例する法線研削抵抗 F_n が発生することを前提にしている. すなわち, 砥石と工作物が干渉すると F_n の増加に伴って砥石軸は上方に変位する. 工作物表面は, 運動する砥石外周の包らく面に沿って加工されるから, 工作物の左端に図のような入口ダレが生じることになる. 本図で注目されるのは, 砥石と工作物の干渉後, たちどころに振動が収束して定常的な加工に移行していることである.

筆者はこの原因を探るため, 砥石軸を上下方向に単振動($y = A \sin \omega t$)させたときの, 砥石軸の運動と法線研削抵抗 F_n および等価剛性に起因する機械系の反力 F_K の変化を調べた. この際, 共振しやすい条件で振動の影響を調べるため, 加振周波数 ω を共振周波数 $\omega_n = 518\text{rad/s}$ に一致させた.

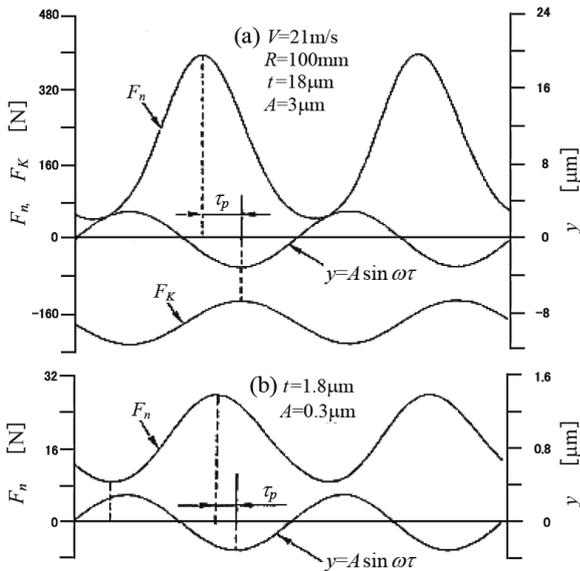


図3 砥石を強制振動させたときに現れる研削粘性

図3(a)は、砥石周速度 $V=21\text{m/s}$ 、砥石半径 $R=100\text{mm}$ 、設定切込み $t=18\mu\text{m}$ 、振幅 $A=3\mu\text{m}$ としたときの結果である。砥石軸が最大変位したとき、これを押し戻そうとする反力 F_k は最大になっており、当然ながら減衰には寄与しない。一方、法線研削抵抗 F_n の変化を見ると、砥石の上下動とは τ_p 時間の位相ずれがあり、下方への運動速度が速いときに F_n が大きくなっている。つまり、振動を抑制する力が働いている。これは、砥石と工作物の幾何学的な干渉プロセスが減衰作用をもたらすことを意味しており、「研削粘性」³⁾ と呼ばれている。

一方、図3(b)は設定切込みと振幅をともに1/10にしたときの結果であり、位相のずれ τ_p が小さくなって減衰作用が低下している。このことは、仕上面の品質を向上させるためにスパークアウト研削を行っているのに、うねりが消えにくいことに繋がる。小径の工作物あるいは小径の砥石を用いた円筒外面研削においても、砥石と工作物の接触長さが短くなるために研削粘性の効果が低下する³⁾ ので注意を要する。

2.3 研削系の安定性

図4に、研削加工系の振動モデル²⁾³⁾を示す。ここでは、工作物側の再生効果と、砥石側の再生効果を分離して考えるため、図1と異なり、砥石と工作物の支持系を分けて表現している。いま、砥石側の等価質量を m_s 、等価静剛性を K_s 、等価減衰係数を c_s 、工作物側の等価質量を m_w 、等価静剛性を K_w 、等価減衰係数を c_w

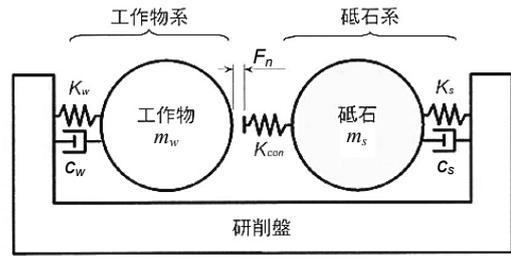


図4 研削系の振動モデル

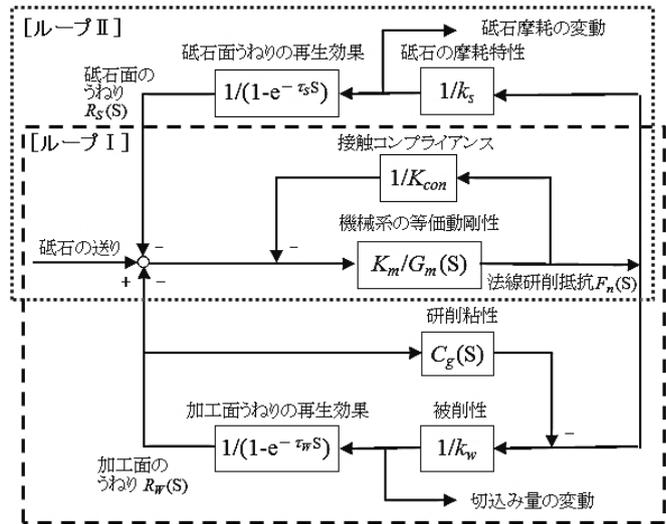


図5 再生効果を有する研削系のブロック線図

と書くと、工作物系の動剛性 $K_w/G_w(j\omega)$ と砥石系の動剛性 $K_s/G_s(j\omega)$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$\frac{K_w}{G_w}(j\omega) = -m_w\omega^2 + jc_w\omega + K_w \quad (5)$$

$$\frac{K_s}{G_s}(j\omega) = -m_s\omega^2 + jc_s\omega + K_s \quad (6)$$

また、接触剛性を含めた研削システム全体の動剛性 $K_{res}/G_{res}(j\omega)$ は次式で与えられる。

$$\frac{K_{res}}{G_{res}}(j\omega) = \frac{1}{\frac{G_w}{K_w}(j\omega) + \frac{G_s}{K_s}(j\omega) + \frac{1}{K_{con}}} \quad (7)$$

図5は、米津²⁾や李³⁾らが提案した研削系のブロック線図をモディファイしたものである。本図と、図1に示した機械系の等価静剛性 K_m と上記の K_w 、 K_s との関係は次式のとおりである。

$$K_m = 1 / \left(\frac{1}{K_w} + \frac{1}{K_s} \right) \quad (8)$$

さて図5は、工作物側の再生効果を現すループIと砥石側の再生効果を現すループIIから構成されているが、本稿では紙面の都合で工作物側の再生効果のみ

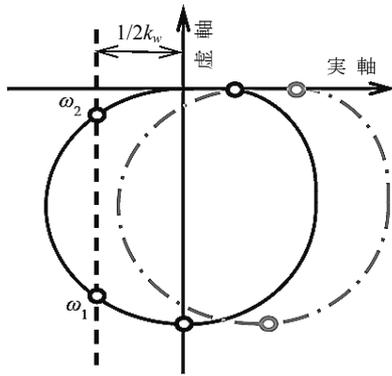


図6 ベクトル軌跡の一例

について述べる。

ループ I の特性方程式は、次式で与えられる。

$$1 + \frac{G_{res}(S)}{K_{res}} \{ C_g(S) + k_w(1 - e^{-\tau_w S}) \} = 0 \quad (9)$$

ここで C_g は研削粘性、 τ_w は工作物の回転周期であり、 S はラプラス演算子を示す。振幅が拡大する(系が不安定になる)条件は、次式で与えられる³⁾。

$$\text{Re} \left[1 / \left\{ \frac{K_{res}}{G_{res}(j\omega)} + C_g(j\omega) \right\} \right] = -\frac{1}{2k_w} \quad (10)$$

つまり、ベクトル軌跡の実部 Re (左辺の [] 内の実部) が右辺に一致するかどうかで判定できるとされている。

図6は、ベクトル軌跡の一例を示したもので、実線の場合には軌跡が $-1/2k_w$ と交差しているが、一点鎖線の場合には交差していない。したがって、前者は系が不安定で、振動が発生しやすいと言える。

図7は、系を安定化させるための方策を分類したものである。図(b)は $-1/2k_w$ の位置を左に動かすことで系を安定化させようとするもので、研削剛性 k_w を小さくする、つまり工作物速度を低下させたり、切れ味の良い砥石を用いたりすることによって実現できる。図(c)は、例えば加工中に工作物の回転数を変化させて、再生効果が発生しないようにするものである。図(d)はベクトル軌跡を右側に移動させる方法であり、接触剛性の小さい(弾性に富む)砥石を用いれば実現できる。図(e)は機械系の静剛性を高めることで、図(f)は機械系の減衰能を強化することで、ベクトル軌跡の半径を小さくしようとするものである。

工作物表面に生じたうねりの再生効果に伴うびびり振動は、比較的早く拡大するが、図5のループIIに示

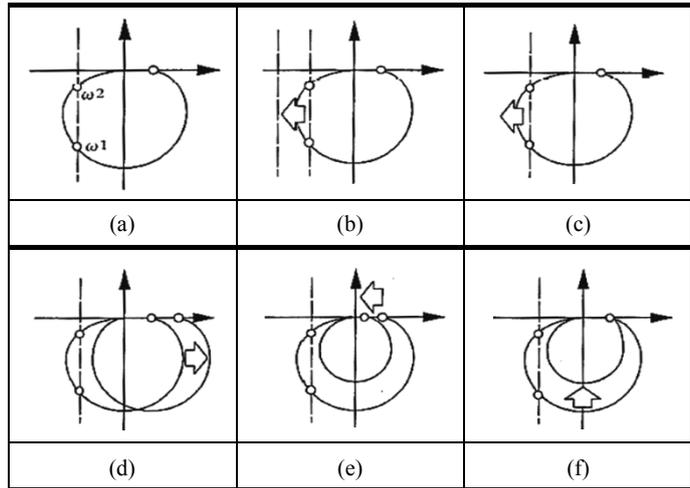


図7 再生びびり振動の抑制方法(李)

した、砥石表面に生じたうねりの再生効果によるびびりは、砥石の摩耗プロセスを通じて発生するので、うねりの拡大に時間を要する⁴⁾。ただし、切り屑長さが長く、かつその厚さが薄くなるような加工条件(4回目のレクチャー参照)では砥石の摩滅摩耗が促進されるので、うねりの拡大が早まる。研削をさらに続けると大きなびびり振動が発生し、ついには研削を続けることができなくなる。このため、びびりは砥石寿命の判定基準(再ドレッシング時期の決定)に用いられることがある。

3. おわりに

研削粘性や研削だれの解析は過去に行ったが、緒言で触れたように研削系の安定性解析については経験がない。このため、参考文献に掲げた報告書や解説記事を参考にさせていただいた。この場を借りて、著者の方々に御礼申し上げる。

なお、びびりに対する現場的な対処法については、砥石と研削・研磨の総合情報サイト(<http://www.toishi.info>)に記載があるので、参考にさせていただきたい。

4. 参考文献

- 1) 塩崎 進, 宮下政和, 古川勇二: 研削における自励振動の発生と発達過程, 日本機械学会論文集(第3部), 36, 281, (1970) 143.
- 2) 米津 栄, 稲崎一郎 ほか2名: 研削におけるびびり振動と形状精度, 日本機械学会 工作機械の剛性および切削性能の向上に関する研究分科会研究成果報告書, (1974).
- 3) 例えば, 李 和樹: 工作機械の剛性と精度(4), 砥粒加工学会誌, 43, 3, (1999) 112.
- 4) 稲崎一郎, 米津 栄: 平面および円筒研削におけるびびり振動, 精密機械, 35, 1, (1969) 47.