円筒プランジ研削における振動抑制の一方法*

星 鐵 太 郎** 三 井 聡*** 堀 内 宰**

A Method for Controlling Vibration in Plunge-cut Cylindrical Grinding

Tetsutaro HOSHI, Satoshi MITSUI and Osamu HORIUCHI

For the purpose of obtaining practical guidelines for controlling the vibration that produces on the plunge-cut ground surface the local variations of the light reflectivity, the mechanism by which the dynamic unbalance of the rotating grinding wheel generates the dynamic variation of the instantaneous stock removal and hence the onset of the grinding vibration has been studied by theoretical analysis as well as grinding experiments. Experiments have also been carried out to optimize the method of varying the rotational speed of the wheel, of which effect was demonstrated by a former study. By monitoring the oscillation of the machine body at the frequency of the wheel rotation, it is first recommended to adjust the wheel balance to minimize the monitored oscillation prior to the dressing operation. The subsequent grinding operation has to be carried out without introducing any balance adjustment and wheel speed variation after the dressing. Effect of the balance adjust procedure in suppressing the grinding vibration is further enhanced by introducing the wheel speed variation. According to grinding test results comparing the rectangular and triangular patterns of the wheel speed variation, the former has been found more effective, which at a $\pm 10\%$ range variation for 4 minutes period seems to result in an optimum effect for practice.

Key words: grinding vibration, vibration suppression, dynamic wheel unbalance, between-dressing wheel life, alternating wheel speed

1. 緒 言

砥石の動的アンバランスにより生じる強制的な機械振動が、研削中のびびり振動に及ぼす影響を明らかにし、びびり振動の発達を抑制する実用的な方法を示すことが本研究の目的である。

アンバランスを持つ砥石の回転は研削盤全体の揺れを引き起こし、それに伴って微小ではあるが、工作物あるいはドレッサに対する砥石軸心の相対的振動変位が生じる。これは砥石の回転に同期して、砥石の回転周波数において生じる。一方、研削中にはそれより高い周波数の振動が生じ、研削時間と共に振幅が増大して、びびり振動と呼ばれる状態に至るのが普通である。これまでの研究¹⁾により、びびりとなる振動は次の3項目を考慮した理論モデルに従うことが明らかにされている。

(1) 砥石の動的アンバランスあるいは硬さむらな

* 原稿受付 昭和61年8月13日、昭和61年度精密工学会東海支部豊橋地方講演会(昭和61年7月18日)にて発表

** 正 会 員 豊橋技術科学大学(豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘1-1)

*** 東芝機械(株)(沼津市大岡 2068-3)

どによって生じる砥石の回転に同期した強制的外乱振動の高調波振動成分

(2) 研削抵抗の静的大きさに連動して変化する非線形特性を示す砥石表面の作用剛性

(3) 砥石面再生効果

また、同じ理論に基づく最近の研究²⁾によって、砥石回転数を高低二つの速度に切り換えながら研削する方法により、びびり振動の発達を抑制して砥石のドレッシング寿命を延長する顕著な効果のあることが示された。

本研究は理論モデルに含まれる第一の項目である砥石の動的アンバランスの影響について、理論と実験の両面から解析を行い、砥石回転数を変動する方法と合わせて、実用の可能性が期待できる具体的な振動抑制の方法を示すものである。

2. 実験の装置と条件 (図1参照)

使用研削盤：大隈鉄工所製精密円筒研削盤(GCS-450形)

工作物：S55C焼入材(HRC=34)，研削幅45mm×2連，全長160mm，加工部直径50～45mm

Fig. 1 Illustration of the setup for grinding experiments

砥石：A 60 KV 7 (ϕ 400 mm $\times$ 50 mm)

研削液：ソリューション形水溶性研削液（シムクル S-4）40 倍

ドレッシング条件：単石ダイヤモンドドレッサによる，切込み量 $20\ \mu\text{m}$ ，ドレッシングリード砥石 1 回転当たり $0.19\ \text{mm}$ ，両方向ドレッシング 2 往復

研削条件：基準砥石回転数 $1600\ \text{rpm}$ ，変速幅 $\pm 2.5, 5, 12, 15\%$ ，周期 $1, 2, 4, 8\ \text{min}$ ，変速パターン一定，矩形波，三角波，工作物回転数 $60\ \text{rpm}$ ，砥石切込み速度 $30\ \mu\text{m}/\text{min}$

加速度ピックアップ：B & K 4370 形

データレコーダ：TEAC R-61 形

FFT アナライザ：小野測器 CF 500 形

砥石のバランス調整：動的アンバランスによる機械の揺れに同期させて，電子制御ノズルから微量の水を噴射させ，砥石の取付けハブに組み込んだリングに設けた，多数のポケットの一部に注入することによってバランス調整を行うオートバランス³⁾を使用している。

砥石速度変速：砥石軸駆動モータは三相誘導電動機で砥石軸に直結されており，速度レギュレータから出力される矩形波状または三角波状の電圧指令に従って周波数変換器（安川電機 616 形， $3.7\ \text{kW}$ ）によって変速している。

3. 砥石の動的アンバランスにより生じる瞬間研削量変動の解析

砥石はまずドレッシングによって整形され，続いて工作物の研削に用いられる。不平衡質量を持つ砥石の

Fig. 2 Shape of the dressed grinding wheel and variation of the instantaneous stock removal when the wheel center oscillates with reference to the workpiece and the dresser

回転によって，工作物に対して生じる砥石の軸心の相対的振れ回りが，円軌道をたどる場合 (a) と直線上を往復する場合 (b) の二つの理想の場合を考える。工作物の研削点とドレッサ先端とは，砥石円周上の異なる位置にあるものの，面者間には相対振動がないものと仮定する。

(a) 円軌道をたどる場合

アンバランスによる砥石軸心の運動が半径 R の円軌道上の公転運動である時，砥石外周はドレッシングにより図 2 (A) に見るように偏心した円形に整形される。その後に公転運動の軌道半径が R から変化しなければ，偏心円の回転と公転運動とは同方向に同速度で生じるため，工作物がドレッサに対してどの角度位置にあっても，工作物と砥石外周面との間には，振動的相対変位が生じない。しかし，ドレッシング後に円軌道半径が $R + \Delta R$ に変化すれば，図中の細い実線群が示すように，砥石外周は工作物に対して片振幅 ΔR の切込み量の変動を生ずる。

(b) 直線上を往復する場合

アンバランスにより砥石軸心がある一直線上で振幅 R の単弦運動を行う場合には、砥石外周はドレッシングにより図 2 (B) 中の太い実線 1 で示す形状に整形される。ドレッシング後も砥石軸心が同じ単弦運動を行う場合でも、砥石外周は図中の細い破線群 2, 3, 4 で示すように、工作物に対して切込み量の動的変動を生じる。ただし研削点がドレッサ先端の角度位置に一致する場合にのみ動的変動は 0 となる。しかし、この場合でもドレッシング後に砥石軸心の直線運動の振幅が異なる場合には、図中の細い実線群が示すように、切込み量の動的変動が生じる。

実際に生じる砥石軸心の工作物に対する相対的振動は (a), (b) 両者が複合した楕円軌道上をたどるはずであるから、上記の考察を合わせると次の状況が生じるものと推定される。

- (1) ドレッシングによって整形された砥石の外周形状は、厳密には円形ではなく、円形からのずれはドレッサに対する砥石軸心の相対的振動振幅に比例する。
- (2) 砥石軸心の振動がドレッシング時と同一であっても、研削時には工作物に対して砥石作用面の切込み量の変動を生じる。その大きさは砥石円周上どの位置で研削が行われるかによって異なり、ドレッサ位置と同じ位置で研削が行われる場合には変動が生じない。
- (3) 研削時の砥石軸心の振動振幅がドレッシング時と異なる場合、その差に比例した切込み量の変動が付加される。この場合の変動量も砥石円周上の研削点の位置によって異なる。

4. 動的アンバランスの影響

4.1 空転時の振動

前節の理論解析により、工作物またはドレッサに対して砥石軸心が砥石回転に伴って生じる相対的な振動の振幅が問題となるが、研削実験においてそれを直接測定することは困難である。さきの図 1 に示すように砥石台で検出した振動波形 A と工作物の心押しセンタの振動波形 B とを検出し、演算増幅器によって両者の差 $A-B$ を得れば、それを砥石軸心と工作物との間の振動に比例する目安とすることができる。

供試研削盤においては、砥石軸を種々の回転数で回転させ、砥石台の慣性系（地球）に対する振動振幅を測定すると、図 3 中の A に示すように機械の剛体運動モードの固有振動数 22 Hz において最大値を示した。心押しセンタの振動 B との相対振動は図中 $A-B$ に

Fig. 3 Oscillation amplitude of the wheel head A, and its amplitude relative to the work support center A-B, due to the rotation of the grinding wheel at different speeds

示すように、1/10 以下と小さいが、やはり同じ固有振動数で最大値を示した。同図上部には、両者間の伝達関数のゲインと位相特性を示しており、次の高次モードの固有振動数の影響により、 $A-B$ には 26.5 Hz に反共振点が現れ、そこで位相が反転している。

4.2 ドレッシング時と研削時の振動測定

図 4 には砥石台の振動振幅 A と砥石台と工作物心押しセンタ間の相対振動振幅 $A-B$ を両軸にとり、4 つの研削加工状況について、ドレッシング時、研削前の空転時、および研削中の測定値の推移を示している。このうち 3 例においては、ドレッシングを行った後に、オートバランスを操作してアンバランスを人為的に付加した後、研削実験を行っている。各例について、ドレッシング時と、研削時の振動振幅の差を縦軸方向に矢印で示しており、3 章の砥石回転運動の幾何学的考察結果の (3) 項によれば、砥石切込み量にはこの差に比例した動的変動が付加されるものと推定されているので、次にその大きさと砥石寿命との関連を研削実験により検証する。

4.3 研削振動と砥石寿命の測定結果

3 章の理論的考察と 4.1, 4.2 節の測定においては砥石回転数に一致した周波数の振動成分を問題としてい

Fig. 4 Wheel head-work support center relative amplitudes A-B, versus the wheel head oscillation amplitudes A measured during the dressing operation (with triangles), the idle running after the dressing (white circles), and the grinding operation (dark circles)

る。しかし、研削中に測定される振動加速度は、それよりはるかに高い周波数の成分が最大値を示す。これまでの研究¹⁾により、砥石表面の研削点における作用剛性の非線形性によって、砥石回転に伴う切込み量の動的変動は、多数の高調波成分からなる研削力の動的変動を生じ、そのうち機械構造系の砥石表面の作用剛性を考慮した見かけの固有振動数に近い周波数のものが選択的に増幅されて周波数の高い振動加速度成分を生ずるものであることがわかっている。したがって、砥石回転に伴う切込みの動的変動量が大きければ、研削中の振動が大きく、その発達も速やかであるものと推察される。

前節の4つの研削加工状況において、工作物心押しセンタで検出した振動加速度について最大値を示す周波数成分が、研削時間の経過に伴って推移する状況を測定した結果は、図5に示すようになった。すなわち、ドレッシング時と研削時の砥石回転数で生じる相対振動振幅の差が小さいほど（最も小さい0.002 μm の場合には2回の繰返し実験を行っている）、最大加速度を示す周波数成分は研削の初期から小さく、研削時間の経過に伴って発達してびびり振動となる過程の進行も緩慢である。同成分が1 m/s^2 に達する時点をもって砥石寿命とすると、図6に示すようにドレッシング時と研削時の砥石台・センタ間相対振動振幅の差が大きいほど砥石寿命が短くなっている。従って、砥石アンバランスによって生じる相対振動振幅のドレッシング時と研削時の差に比例する動的変動が砥石

切込み量に付加されるとする、3章の幾何学的考察結果の(3)項の効果によってびびり振動の発達速度が左右されることが実験的に確かめられた。

4.4 動的アンバランス調整の実用的指針

相対振動振幅の差を小さくするための実用的指針としては次の3段階の手順に従えばよい。

- (1) ドレッシングを行うに先立ち、砥石の動的アンバランスによる機械全体の揺れを、例えば砥石台の振動Aを監視しながら、それを最小にするよう精密に砥石のバランス調整を行う。
- (2) その後にドレッシングを行い、その後はバランス調整を行わず、ドレッシング時のままの状態で行う。
- (3) 変動砥石速度研削を行う場合以外には、ドレッシング時と研削時の砥石速度を同一に保つ。

5. 砥石速度変動の最適条件

ドレッシング直後から研削中に生じる振動は、砥石回転数の整数倍の周波数をもつ高調波成分の一つであるため、砥石外周にはその整数に等しい山数の起伏が生じはじめ、砥石面再生効果によって成長を続ける。それが、あまり大きくならないうちに砥石回転数を変動させればいったん生じはじめた第1の山数の起伏は修正されて減少し、新たな砥石回転数に対応する第2の山数の起伏が形成される。繰返し切り替えながら

Fig. 5 Vibration acceleration detected at the work support center versus the grind time during the grinding experiments performed with different amounts of the wheel unbalance created by the procedure shown in the previous figure

Fig. 6 Life of the wheel surface after the dressing operation defined by the 1 m/s^2 maximum acceleration level of the vibration detected at the work support center in the grinding test results shown in the previous figure

二つの砥石回転数で研削を行うことにより、山数の異なる二つの起伏を交互に修正し、振動の発達を抑制するのが、これまでに研究²⁾された矩形波状に砥石速度を変動させる研削方法の原理である。本研究では、三角波状に変動させる場合も含めて最適な変動条件を求める研削実験を行った。

5.1 変動幅による振動抑制の影響（矩形波状変動）

1600 rpm の基準速度に対して $\pm 2.5\%$ から $\pm 15\%$ までの種々の変動幅で、周期 4 min の矩形波状速度変動を行う場合、図 7 上図に見るように変動幅が大きいほど振動の成長を抑制する効果の大きいことがわかる。

同図下図には $\pm 2.5\%$ の変動幅のときに最も顕著であった砥石 1 周当たり 39 山の起伏による振幅加速度成分の推移と、 $\pm 12\%$ のときに最も顕著であった 31 山の起伏によるものを測定の間隔を短くして詳細に比較している。変動幅が $\pm 12\%$ と大きいときに、振動加速度の小さい期間（砥石速度 -12% ）においてそれが徐々に減少する修正作用の生じていることが認められる。

この実験結果により、砥石速度の変動幅は大きい方が振動抑制効果にまさる傾向が明らかである。しかし、変動幅が大きすぎると、砥石回転速度が、図 3 の実験結果にみるような機械全体の剛体運動モードの固有振動数に近づき、砥石・工作物間の相対振動振幅が増大する影響を受けて逆効果が現れやすい。過去の実験例²⁾では $\pm 10\%$ から $\pm 15\%$ に大き

くすると効果が逆転していた。実用的な変動幅は $\pm 10\%$ 程度であると考えられる。その幅の回転数範囲内に剛体運動モードおよび他のすべてのモードの固有振動数が含まれていないことを確かめておく必要のあることは当然である。

5.2 変動周期の影響（矩形波及び三角波状変動）

変動幅を $\pm 10\%$ 一定として、矩形波状変動の周期を 2~8 min、三角波状変動の周期を 1~8 min の間に種々変化して振動の成長を抑制する効果を比較する実験を行った。

矩形波状変動の場合には図 8 上図に見るように抑制効果を最適にする周期が見られ、この実験の場合それは 4 min であった。周期が長ければ、砥石速度が変動する前に砥石表面の起伏が発達しすぎてしまい、その後の修正の効果が現れず、また周期が短ければ修正が十分に行われないため、最適な周期があるものと考えられる。

三角波状変動の場合には同図中図に見るように実験の範囲では周期は短いほど抑制効果が大い。実験を行った最も短い 1 min の周期では同図下図に見るように、周期 4 min の矩形波状変動とほぼ同等な効果を示している。しかし、更に長時間の研削を続ける場合には矩形波状変動の方が効果がまさることが確かめられている。

Fig. 7 Vibration acceleration level versus grind time for different ranges of the rectangular wheel speed variation as compared to the conventional constant wheel speed grinding

Fig. 8 Effect of the period of the variation in the rectangular and triangular wheel speed variations

6. 砥石アンバランス調整と砥石速度変動の効果

動的アンバランスについて得られた4.4節の指針と前節の最適な砥石速度変動条件とを組み合わせた効果を研削実験によって調べた。図9中の加工状況Aは砥

石速度を一定として砥石アンバランスが最小となるように調整してからドレッシングと研削を行ったものである。11 minで振動加速度 0.5 m/s^2 を超える砥石寿命に達している。Bは砥石アンバランス量が大きい状況でドレッシングを行った後、矩形波状速度変動による研削を行ったもので、同じ基準による砥石寿命は29 minに延長している。Cは矩形波状速度変動と砥石アンバランス調整の両方を行った場合で41 minと最も長い砥石寿命が得られた。

7. 結 論

砥石の動的アンバランスにより生じる強制的な機械振動が、研削中のびり振動に及ぼす影響を明らかにし、すでに明らかにされている砥石速度変動の方法とあわせて、びり振動の発生を抑制する実用的な方法を示すことを目的として、理論的考察と研削実験による研究を行った。

その結果、砥石台・工作物センタ間に砥石の回転に伴って生じる相対振動振幅のドレッシング時と研削時における差が小さいほど、研削時に生じる周波数の高い振動が小さく研削時間の経過に伴って発達してびり振動となる過程も緩慢となることがわかり、その差を小さくするために、3段階の手順からなる砥石バランス調整の実用的指針が示された。

また、砥石速度変動は、本研究のように普通砥石を用いる場合には、変動幅を $\pm 10\%$ として矩形波状に周期4 minで変動させるのが適当である。砥石の動的バランス調整と合わせて使用すれば、砥石のドレッシング寿命の延長にさらに効果的である。

参 考 文 献

- 1) 星 鐵太郎, 高本洋祐: 円筒ブランジ研削における振動の発生機構, 精密機械, 49, 12(1983)1680.
- 2) 星 鐵太郎, 松元 茂, 三井 聡, 堀内 幸, 高本洋祐: 砥石変速による研削振動発達の抑制, 精密工学会誌, 52, 10 (1986) 1802.
- 3) 堀内 幸, 小島英男: 新型の液体注入式研削砥石オートバランス, 精密工学会誌, 52, 4 (1986) 713.

Fig. 9 Vibration acceleration level versus grinding time in conventional grinding with minimized wheel unbalance A, alternating wheel speed grinding with unadjusted wheel unbalance B, and alternating wheel speed grinding with the minimized wheel unbalance C