円筒プランジ研削における変位外乱形 強制振動の増幅現象の解析*

高 本 洋 祐**

Analysis of Amplified Displacement Disturbance-type Forced Vibration
in Plunge-cut Cylindrical Grinding

Yousuke KOUMOTO

The amplification of forced vibration in plunge-cut cylindrical grinding is analyzed theoretically and experimentally. In machining works of a certain size range, the forced vibration coming from the gear pump in a specific grinding machine is found to increase gradually or rapidly after start of grinding. This paper discusses a general mechanism of the vibration amplification as experienced with the case and methods of suppression are explained. The effectivity in suppression is confirmed experimentally.

Key words: grinding, vibration, displacement disturbance-type forced vibration, forced vibration amplification, vibration suppression

1. 緒 言

ある円筒研削盤において、砥石軸用流体軸受に油圧を供給するギャポンプの発生する強制振動が研削中に増大していき、許容レベルを越えてしまう現象が観察された。高精度円筒研削に障害となるこの種の外乱振動の抑制は、熟練した作業者に頼ることが多く、理論的説明が欠けている。そのため一つの抑制方法が、ある場合には有効でも他の場合には無効になる、というように真の技術的手法に結びつかない。これまでも砥石の動的アンバランスにより生ずる強制振動（砥石回転数に同期した強制振動）の、びびり振動への発達を抑制する研究¹⁾や、平面研削盤における油圧の脈動に起因するびびりマークをアキュムレータを使用して抑制した例²⁾などは報告されているが、砥石回転数に同期しない強制振動の増幅現象およびその抑制方法を扱った研究は見当たらないようである。本研究ではこの種の振動増幅のしくみを、著者らが先に提案した円筒プランジ研削における、砥石回転に基づく外乱強制振動を考慮した振動の発生機構の理論モデル³⁾を用いて明らかにし、同時にその振動増幅の抑制方法を見いだすことを目的としている。そして外乱振動の影響が観察できる状況で理論的説明ができ、またそれに基づいた抑制方法の効果が確認できたので報告する。

2. 実験の方法

図1に実験装置の概略を示す。円筒研削盤を用い、図2に示す種々の形状の工作物の両端を固定センタで支持し、円筒プランジ研削する。

図1に見るように、心押台側固定センタに取り付けた加速度ピックアップによって研削中の切込み方向の振動を、また砥石軸端のVブリーに固定した無接点スイッチで砥石回転数を検出し、それぞれデータレコーダに記録し、加速度信号はFFT解析器で周波数分析を行う。砥石回転数は、周波数カウンタで常時監視し、速度レギュレータの微調整を行って、設定した回転数を維持するように補正した。

工作機械：豊田工機製万能研削盤（RU 28-50）

* 原稿受付 平成5年8月16日

** 正 会 員 津山工業高等専門学校（津山市沼624-1）

Fig. 1 Illustration of the grinding test setup

Fig. 2 Work shapes and sizes used for grinding experiments

Fig. 3 Time dependent variation of the forced vibration acceleration (994 Hz) (work B)

工 作 物：A, B, C S 45 C 焼入れ材 (HRC=30)

D, E S 45 C なま材

各形状は図 1 に示す.

砥石: WA 60 KV 25 (ϕ 305 mm $\times$ 32 mm)

砥石回転数：32.0±0.05 rps, 31.6±0.05 rps

研削条件：工作物回転数 66.4 rpm（空転時）

切込み送り速度 $1 \mu\text{m}/\text{rev}$ of work

研削液：ソリューション型水溶性研削液

3. 強制振動の観察

3.1 強制振動の振動源と周波数の決定

この円筒研削盤で問題となる強制振動の周波数は、液体注入式オートバランス⁴⁾で十分にバランスをとった (FFT 解析器による観測では砥石台の振動振幅は $0.02 \mu\text{m}$ 以下である) 砥石を空転させている時に発生していた約 994.0 Hz である。この周波数の振動は、砥石回転を止めて砥石軸用流体軸受に油圧を供給するギャポンプだけが作動している時にも発生していることから、ギャポンプが振動源であることがわかった。

3.2 強制振動増大の様子

空中中から存在する強制振動は、通常は研削が始まってそのままのレベルを保つと考えられるが、工作物の形状、寸法によっては図 3、図 4 に示すように研削開始直後から激しく増大していく場合がある。増大の様子を FFT 解析器で観測すると、問題の周波数のスペクトルは短時間の間に大きくなったり小さくなったりを繰り返しながら、次第にそのレベルを上げていく。そして工作物 B では研削開始後 12~13 min で、また工作物 A では 15 min 位でピークに達し、その後はほぼ同じレベルの振動を維持する。これに対して工作物 C, E では研削時間の経過に伴う増大はわずかであり、工作物 D については全く増大は見られない。

Fig. 4 Time dependent variation of the forced vibration acceleration (994 Hz) in each work

Fig. 5 Grinding dynamics model illustrated on the stiffness vector diagram

4. 理論モデルによる考察

4.1 理論モデルの概要

著者らがこれまでに提案した理論モデルを用いて、先に述べた現象を説明するため、その理論の概要を述べる。

研削中の振動の発生には次の3つの現象が重要である。(1) 砥石回転に伴う強制的外乱要因(砥石の動的アンバランスや硬さむら)によって生じ、多数の高調波成分 $F_{dc}^l, F_{dc}^m, F_{dc}^n, \dots$ からなる研削抵抗の変動, (2) 静的研削抵抗の大きさに連動する砥石表面の作用剛性 k_{gw} の変化, (3) 砥石面再生効果により形成された砥石表面のうねりの起伏の, 砥石・工作物間の相対振動振幅 X_d に対する割合を表す砥石面転写係数 ν_g .

動剛性ベクトル線図にそのしくみを表すと、図5 上部の曲線 T_M は砥石と工作物が接触していないときの機械構造系の動剛性ベクトル軌跡である。 T_M 線上に示した点 $Z_m, Z_n, Z_o, \dots$ は周波数を表しており、それらは砥石回転周波数の整数倍の値である。さて研削が始まった時の状況は図の点 a のような $Re(-)$ 軸下方の位置で表すことができる。すなわち機械構造に作用する変動力 F_d は砥石回転に伴う強制的な変動力 F_{de} と、工作物および砥石面再生効果などの過程によって生じる変動力 F_{dr}

ベクトル和であり

$$F_d = F_{dr} + F_{de}$$

と表せる。両辺をその時の振動変位 X_d で除すことにより、上式は機械構造の動剛性 T_M と等しくなり次式が得られる。

$$T_M = \frac{F_d}{X_d} = \frac{F_{dr}}{X_d} + \frac{F_{de}}{X_d}$$

この関係は、生じている振動の各周波数成分について成り立つ。したがっていま周波数 Z_q (Hz) の振動成分に着目すれば

$$\frac{F_d^q}{X_d^q} = \frac{F_{dr}^q}{X_d^q} + \frac{F_{de}^q}{X_d^q}$$

となり、図に示すベクトル三角形の各ベクトル $\vec{OZ_q}$, $\vec{Oa}$, $\vec{aZ_q}$ がそれぞれ F_d^q/X_d^q , F_{dr}^q/X_d^q , F_{de}^q/X_d^q に対応する。そして $\vec{aZ_q}$ が、他の考えるすべての点 $Z_m, Z_n, \dots$ へ向かうベクトルより短ければ、分母である相対振動 X_d のすべての周波数成分の中で周波数 Z_q の成分が最も大きいことを示している。

研削初期において周波数 Z_q の振動成分が最も大きく生ずる状態が持続すると、砥石作用面には1周当たり q 山のうねりを生じはじめ、砥石面転写係数 ν_k はもはや0でなくなり、砥石面再生効果によって図中にベクトル $\vec{ab}$ で示す新たな変動研削力が生じる。なお通常の円筒研削では工作物再生効果は極めて小さいのでここでは無視する⁵⁾。さらに砥石摩耗が進み ν_k が増大すると、ベクトル $\vec{ab}$ は点 Z_q に向かって伸延し、総変動力 F_d^q 中に占める砥石面再生効果による変動力の割合が増大する。その結果ベクトルは $\vec{bZ_q}$ のように短くなり、砥石回転に伴う強制的変動研削抵抗 F_{de}^q の大きさが変わらないので、分母である相対振動変位 X_d^q はますます大きくなっていく。

4.2 動剛性ベクトル線図による解析

インパルス応答試験によって求めた、砥石と工作物が接触していない時の機械構造のコンプライアンス伝達関数を図6に示す。各固有振動数は工作物AとBが581.3 Hz, Cが700.0 Hz, Dが993.7 Hz, Eが731.3 Hzで、工作物Dの場合、問題となった外乱の周波数とほとんど一致している。

コンプライアンス伝達関数にそれぞれの位相情報を組み合わせて求めた動剛性ベクトル線図を図7に示す。図には問題となった約994 Hzの外乱振動の増大が最も激しかった工作物Bのベクトル軌跡のほぼ全体を示しており、他の工作物については994 Hzに対応する点のみを、工作物の記号とともに示している。図において、研削初期の状況は後に述べる実験の結果から推定すると、点aのような位置で表すことが出来る。すなわちベクトル $\vec{Oa}$ の長さがインナモジュレーションを表し、その虚数部効果によって生ずる減衰効果⁶⁾のため、 $\text{Re}(-)$ 軸より角度 ε だけ下方に向かった位置にある。994 Hzの外乱振動の増大が最も激しかった工作物Bについて見てみると、ベクトル線上の994 Hzの点aが、点aに非常に近いことがわかる。この周波数は砥石回転周波数のほとんど31倍周波数であり、理論モデルで述べたように F_{de}^{31}/X_d^{31} に対応するベクトルが他の周波数の点に対するものより短いため、研削初期から994 Hzの振動が顕著に現れるものと理解される。そして研削系の外から入った994 Hzの外乱が同位相で入ってきたため、励振作用を及ぼし、研削初期から994 Hzの振動が激しく増大して

Fig. 6 Dynamic compliance of each work in noncontact with the wheel

Fig. 7 Stiffness vector diagram of grinding dynamics explaining the amplified vibration at 994 Hz

いったものと考えられる。研削の進行につれ砥石面再生効果によってa点はa'点へと移動していき、994 Hzの振動はますます大きくなっていくことになる。

工作物Aについては、ベクトル線は工作物Bより少し上方にあり、また工作物の幅がBより少し小さいため k_{gw} が少し小さくはなるが、Bの場合とほぼ同様に考えることができる。工作物C, Eについてはベクトル線はかなり上方にあり、994 Hzの点もa点からはるかに離れているため、994 Hzの振動は顕著にならない。しかし工作物Dについては、研削幅を極端に小さくすると k_{gw} が小さくなり、したがって F_{de}^{31}/X_d^{31} が小さくなって振動変位振幅 X_d^{31} が大きくなる可能性がある。このことを確かめた実験結果を図8に示す。図から研削幅を1/4, 1/8, 1/25と小さくしても994 Hzの振動振幅の増大は生じていないことがわかる。これは研削幅が小さくなるにつれて F_{de}^{31} も小さくなり、 X_d^{31} の増大が観測しにくくなってしまったためと考えられる。したがって、D点のような特性を持つ工作物を研削する場合、その外乱振動の影響は実用上差し支えなく、外乱振動が有害となるのは、A, BのようにO点から $\text{Re}(-)$ 方向に隔たった所で動剛性ベクトル軌跡が $\text{Re}(-)$ 軸に接近する場合であることがわかった。

4.3 振動増大の抑制方法

Fig. 8 Variation of the forced vibration when grinding the work D with small grinding width

Fig. 9 Variation of the amplified forced vibration by changing the wheel speed slightly

これまでの考察から、問題となった外乱の周波数の振動増大を抑制するためには二つの方法が考えられる。すなわち

- (1) 砥石回転数をわずかに変化させ、994 Hz が砥石回転周波数の整数倍に近くならないようにして、外乱による励振作用を防ぐ。
- (2) 研削幅を変えるなどして作用剛性 k_{gw} の大きさを変え、図7のa点の位置がb,cあるいはd点に移動するようにし、ベクトル線上の994 Hzの点から遠ざかるようにする。

図9は砥石回転数を 32.0 ± 0.05 rps から 31.6 ± 0.05 rps とわずかに変化させた時の結果で、前者の約31.0倍、後者の約31.5倍が外乱の周波数994 Hzである。図から工作物A,Bともに十分とはいえないがかなりの抑制効果が認められる。

図10は砥石回転数 (32.0 ± 0.05 rps) は変えず、工作物の

Fig. 10 Variation of the amplified forced vibration by changing the grinding width

Fig. 11 Work shape and its stiffness vector diagram used for the grinding test changing the grinding width very widely

研削幅を変化させることによって作用剛性 k_{gw} を大きく変えて行った実験結果であり、抑制効果が確実に現れていることがわかる。研削幅を1/2, 1/4にするということは、図7でa点がほぼb,c点に移動することであり、前述の理由から X_d^{31} の振動振幅は小さくなる。また研削幅を大きく増やしてa点をd点あたりに移動させることも有効と考えられる。このことを確かめるため図11に示すような動特性を持つ工作物を作製し、研削幅を大きく変化させた実験を行った。この時、994 Hzの外乱振動の増大を最も速やかにする研削幅は11.5 mmであり、この値を中心にして研削幅を増減した。図12の(a),(b)に実験結果を示す。研削幅を減少させた時はこれまでと同じ結果を示しており、逆に増大させた場合も、研削幅の増大とともに外乱振動の増大は小さくなっていることがわかる。

Fig. 12 Variation of the amplified forced vibration by decreasing and increasing the grinding width (w) when grinding the work having the dynamic stiffness in Fig. 11

k_{rw} を変化させる別の方法として、切込み送り速度を変えることも考えられる。工作物 B を用いて、それを $2 \mu\text{m/rev}$, $3 \mu\text{m/rev}$ と変化させて研削を行ったところ、994 Hz の振動増大はますます激しくなった。このことは図 7 で、点 a が 994 Hz の点からの最短距離の点 m に近づく方向に移動したと考えることができ、逆に点 a の概略の位置を推定できた。

5. 結 論

ある研削盤においてギャポンブから発生する強制振動が研削中に増幅される現象を、さきに提案した動剛性ベクトル線図を用いる理論モデルに当てはめて解析した。その結果、ベクトル線図が問題の外乱振動の周波数において、O 点から $\text{Re}(-)$ 方向に隔たったところで $\text{Re}(-)$ 軸に接近する場合には増大が生じることがあり、遠く離れている場合には増幅現象は生じないことがわかった。

この研究により、砥石回転数に同期しない外乱振動がある場合に、それが研削中に増幅されて有害な振動となる機構とその条件が明らかとなった。その場合の振動増大の抑制方法として

- (1) 砥石回転周波数は、その整数倍が外乱の振動周波数に一致、もしくは近くにならないようにする。
 - (2) 研削幅を $1/2$, $1/4$ あるいは 2 倍などにして、接触剛性を大きく変える。
- の 2 つがあるが、(2) の方法が効果的である。

本研究を遂行するにあたり、貴重な助言を頂きました豊橋技術科学大学星鐵太郎教授に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 星 鐵太郎, 三井 聡, 堀内 幸: 円筒プランジ研削における振動抑制の一方法, 精密工学会誌, 53, 6 (1987) 940.
- 2) 劉 錫強, 中野嘉邦, 加藤秀雄: 平面研削における油圧の脈動に起因するびびりマークの抑制, 精密工学会誌, 55, 3 (1989) 514.
- 3) 星 鐵太郎, 高本洋祐: 円筒プランジ研削における振動の発生機構, 精密機械, 49, 12 (1983) 1680.
- 4) 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.
- 5) 例えば, 砥粒加工研究会編: 砥粒加工技術便覧, 日刊工業新聞社, (1955), 843.
- 6) 星 鐵太郎: びびり現象, 工業調査会, (1977) 46.