

研削における振動

Vibration in Grinding

谷 泰 弘*

Yasuhiro TANI

研削加工においては、高精度の仕上げが要求されるために、切削以上に振動が大きな問題となっている。ところが研削は現象が非常に複雑であるがために、振動のメカニズム等についてあまりよくわかっていないといいたい。本報告は、まず研削の振動の特徴を切削の場合と比較して述べ、次にその発生メカニズム・理論的アプローチ・振動抑制のための対策について、最近、筆者が調査した範囲内で説明を加える

1. はじめに

研削加工においては一般に切込み量が微小であるうえに、高い加工精度が要求されるために、振動が非常に大きな問題となっている。また砥粒切刃がランダムに分布しているために、被削材と砥石との間に作用する研削力は、砥石回転数に一つのピークを有する定常不規則な白色雑音過程となっており、こうした意味で研削はもともと振動の要因となるものを、その現象自体に内包しているといえる。しかし逆に切刃の分布がランダムであること・切刃のすくい角が負であることなどのように、振動を抑制する成分をも有している。この両者が均衡しているうちは、振動が問題とならないが、いったん、この均衡が破れると振動が増大する。このような振動の増大は、加工精度の低下につながるだけでなく、砥石寿命を決定し、さらには加工能率の低下の原因ともなる。

研削はその現象が複雑であるために、その振動も非常に把握しにくいものとなっている。本稿ではこの研削における振動について筆者が最近調査した範囲で、その理論的アプローチ・振動抑制のための対策等について説明する。

2. 研削での振動の特徴

研削における振動を考えると、切削における振動と比較すればその特性を把握しやすい。それでは、いったい研削と切削ではどう違うのか考えてみよう。前章でも述べたが、まず第一に要求されるのが高い加工精度であるということである。このために自然と切込み量も小さくなっている。したがってたとえ砥石の振動振幅が小さくても問題となってくる。事实现場においては $0.1 \mu\text{m}$ オーダの表面のうねりでき問題となっている。また通常では問題とならないような微小な砥石と被削材間の弾

性変位量も、多大な影響を及ぼすこととなる。これが解析において接触剛性と呼ばれているものである。

次に工具である砥石が高速回転をするということである。このために砥石の動的不平衡や偏心が強制振動源となっている。また Snoeys¹⁾ によればジャイロ効果により振動が生じることが示されている。すなわち静圧軸受で、回転数可変の砥石軸で加振実験を行い、与えられた主軸回転数に対して四つの固有振動数が存在し、その二つが回転方向で、他の二つが逆方向のふれまわりであることを確認している。このときの固有振動数と振動モードは回転数に依存することも述べられている。

第三に切刃が多刃でその分布がランダムであるということである。このために研削力が砥石一回転で変動し、前述のように入力角が砥石回転数に一つのピークを有する定常不規則な白色雑音過程となっている。また切刃が多刃であるがために、小切込み下では非切削時間が生じている。このことは振動を抑制するのに寄与しているものと考えられる。また研削では同一切刃が継続して切削に関与することはほとんどなく、こうした意味で力は衝撃の形で加えられることになる。さらに研削には特有のドレッシングという作業があり、このことを実作業の前に行うことにより、すでに振動の原因が前もって作られるようなところもある。研削における切刃である砥粒は一般に負のすくい角を有しており、このことは法線方向の力を増大させると共に、摩擦力を増大させ、振動の安定化につながるということとなる。

最後に研削は現象が複雑ということである。まず砥粒の摩耗・破砕があり、これを内包した形で砥石の減耗がある。砥石の減耗の大部分は砥粒の脱落および破砕によるものであるが、これら砥粒の摩耗と砥石の減耗と砥石の目づまりが接触剛性や研削剛性に多大の影響をおよぼすこととなる。さらに砥粒の摩耗や砥石の減耗は摩耗剛性を決定するものとなる。これら研削の諸現象は定性的には同一であっても、定量的には非常にばらつきが大きい

* 東京大学生産技術研究所 第2部

い、すなわち表面的には同一条件にて研削を行っても、振動が生じたり、また逆に生じなかったりするのである。

上述のような切削との相違を有した研削の振動は、結果的に次のような特徴を持っている。すなわち Snoeyers²⁾ が 1969 年に MTDR に発表した論文によれば、再生効果が被削面のみならず、砥石面にも生じること、砥石の摩耗や砥石と被削材の間の接触剛性を考慮する必要があり、振動の成長にかなりの時間を要すること、ブロック線図のうえでは砥石と被削材の両方に再生効果が存在し、二重のむだ時間のループができること、などである。研削には円筒・平面・心なしという、大きくわけて三つの加工形態が存在するが、このうち心なし研削においては独特の現象が存在することが古川³⁾ によって報告されている。これは幾何学的成円機構と呼ばれるもので、図 1 に示されるように加工中たとえ研削砥石、受板、および調整砥石相互の間に相対変位が生じていない場合でさえも、被削材支持系の幾何学的な配置の影響のみで切込み変化が生じ、その結果加工面うねりが形成

される、というものである。

3. 研削における振動の発生機構

研削における振動の発生および発達過程については、牧野⁴⁾ や塩崎⁵⁾ が実験により次のようなことを確認している。図 2 に示すように、

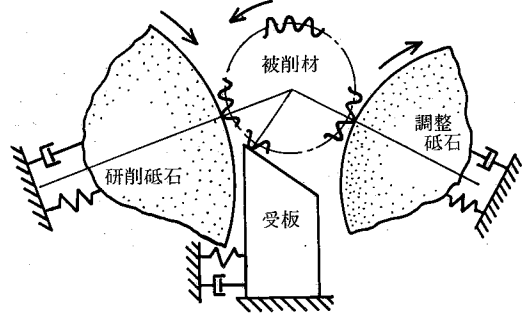


図 1 心なし研削加工系のモデル

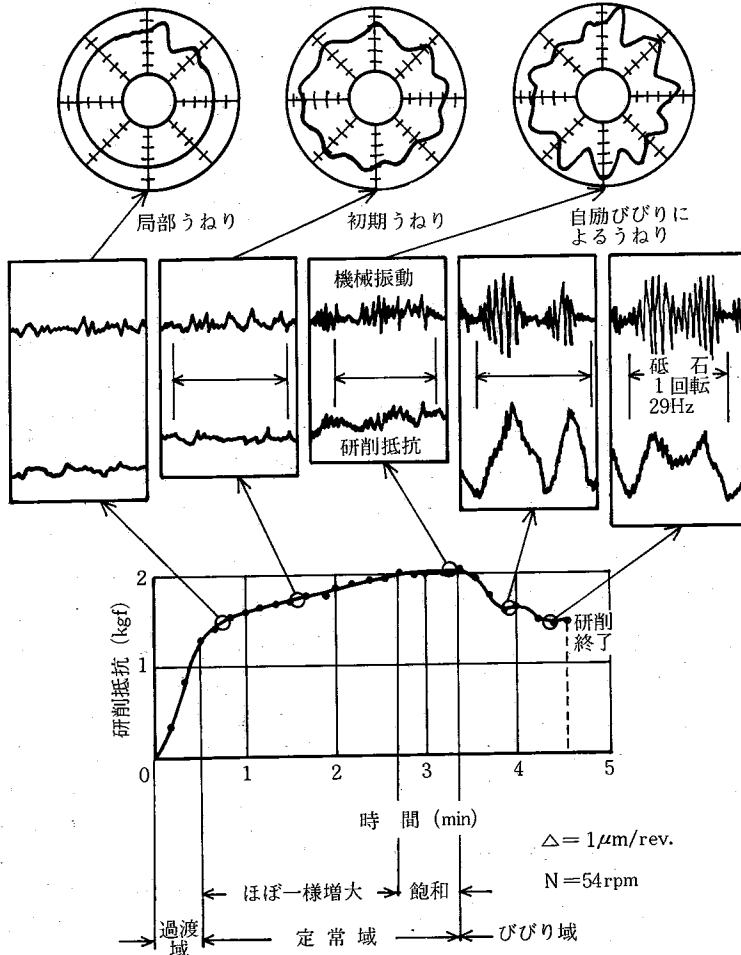
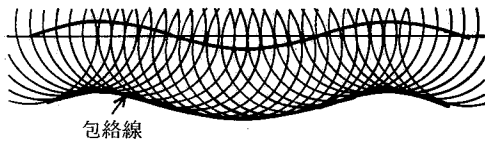


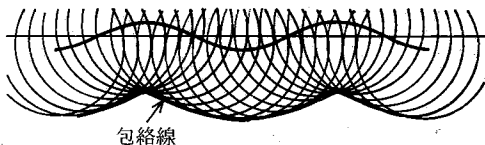
図 2 研削における振動の発生機構

- (1) 研削開始時における振動は白色雑音に類するものであるが、研削が進むにしたがって砥石・被削材間の連成ばね剛性を含めた研削振動系の固有振動数があらわれ、しだいにその振幅が増大する。これにより砥石面には局部うねりが形成される。
- (2) 静的研削抵抗が増大する間は系の固有振動数が時間的に変化し、うねりの個数も変化する傾向をもつので、こうした初期うねりは固定した個数のうねりが砥石全面に一樣に発達することはない。したがって砥石うねりによる振動の成長も抑制される。
- (3) 静的研削抵抗が飽和する時期に達すると、系の固有振動数が一定となり、共振状態が保たれる。そこで砥石うねりが成長するとともに、これが砥石全周にひろがる。振動振幅は増大し、その周波数のスペクトルはするどくなる。そしてついに砥石全周における砥粒のはげしい破壊的摩耗が生じ、砥石の寿命となる。

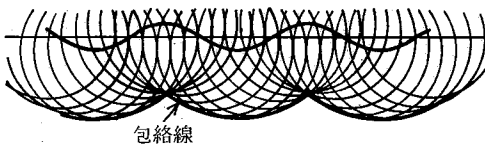
このように研削においてはもともと存在している振動成分の中から、系の固有振動数に近いもののみが増幅されて現れ、いったんその振動が生じると、再生効果等により発達してゆくものと考えられる。しかし図3に示すように過不安定域にある研削条件でも、実際には砥石と被削材が離れる作用と砥石の被削材表面への幾何学的な干渉によって、振動はある限界の振幅で定常化すると主張されている。



(a) 被削材速度 > 臨界速度



(b) 被削材速度 = 臨界速度



(c) 被削材速度 < 臨界速度

図3 砥石の被削材表面への幾何学的干渉作用

4. 安定解析と再生効果

図4には安定解析を行うために、米津ら⁶⁾によって描かれた研削過程のブロック線図を示す。このように研削では砥石面の再生効果によるループと被削材の再生効果によるループの二つから成りたっている。研削の安定解析を行うには、まず砥石-被削材間の接触剛性、研削剛性、砥石摩耗剛性について調べておくことが必要となる。米津らは同論文にて図5のような砥石と被削材との変形モデルにより、Herzの弾性接触理論から接触剛性を算出している。すなわち砥石-被削材間の接触弾性変形による

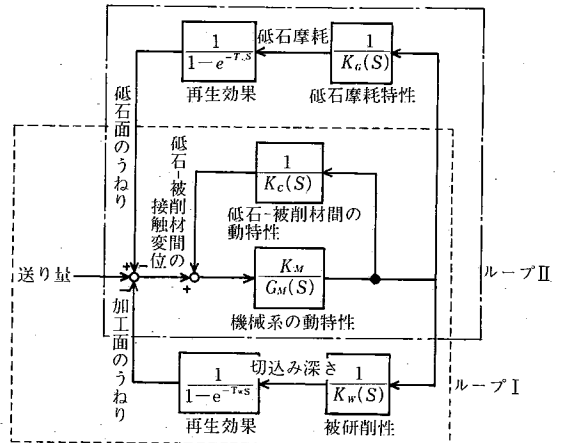


図4 研削過程のブロック線図

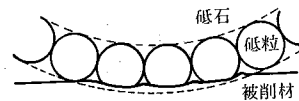


図5 砥石-被削材間の変形モデル

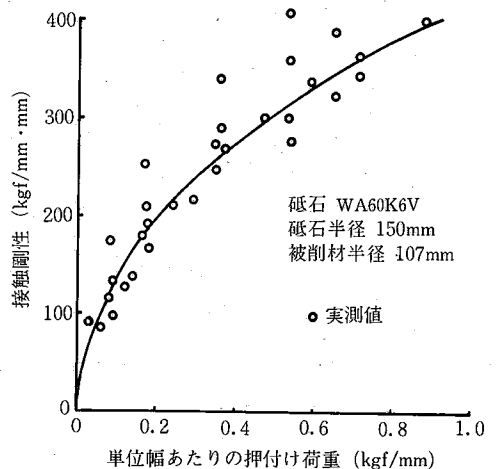


図6 接触剛性と押付け荷重の関係

接近量を、砥石を均質な弾性体と仮定した場合の砥石-被削材間の接近量と、砥粒を均一な径の球と見なしたときの砥粒-被削材間の接近量とにわけて導出している。図6はその結果で、これによれば接触剛性はhard spring形の特徴を有している。押付け荷重として、研削抵抗の実験式を導入することにより、接触剛性と研削条件との関係が求められる。図7は円筒研削における接触剛性を速度比(砥石と被削材の周速の比)に対してプロットしたものである。これによれば速度比あるいは切込みが大きいほど、接触剛性が增大することがわかる。

接触剛性は接触している砥粒数や砥粒の形状等によっても変化するものである。研削時間の経過に伴い、砥石の摩耗が生じ、砥粒数・砥粒の形状に変化が生じることは十分に考えられる。米津らはこのことにより接触剛性の時間的変化がわかるとしているが、砥石の摩耗は一意的でなく、実際にこの接触剛性を決定することは非常に困難なことと思われる。こうした意味から接触剛性は砥石の摩耗特性に従属であるものと考えられる。

一方動的研削剛性は、単位切込み深さの変動による研

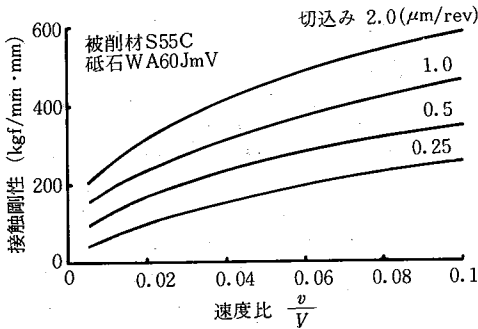
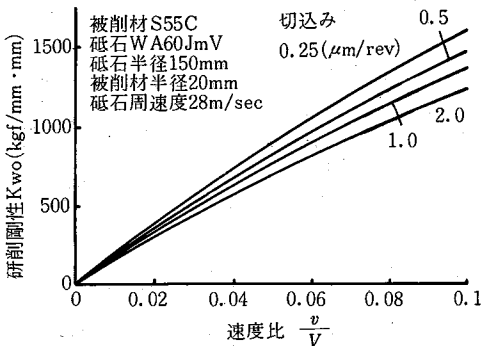


図7 円筒研削における接触剛性
砥石半径150mm・被削材半径20mm
砥石周速度28m/sec・砥粒数2個/mm²



削抵抗の変動量であるが、これも砥粒数や砥粒の形状により多大の影響を受けることが考えられる。一般的に動的研削抵抗は、

$$F(t) = K_{wo} \cdot h(t) + C_w \cdot \dot{h}(t)$$

という形で書かれる。すなわち切込み $h(t)$ に比例する項と、切込み速度に比例する項の和の形となっている。この研削剛性は米津らによれば、図8のように求められている。 K_{wo} と C_w は速度比が大きいほど、共に増大しているが、切込みに関しては逆の変化を示している。

砥石摩耗剛性は、研削比を R として、

$$\frac{K_w}{K_c} = \frac{v/V}{R}$$

で示されるとしている。これによれば上式の値は、通常の研削加工では $10^{-2} \sim 10^{-4}$ のオーダーで、他の剛性に比較して非常に大きくなっており、無視することができる。

図4のブロック線図をもとに、円筒プランジ研削の場合には、

$$\frac{G_M}{K_M} + \frac{1}{K_C} + \frac{1}{K_w} \frac{1}{1 - e^{-T_w S}} + \frac{1}{K_C} \frac{1}{1 - e^{-T_C S}} = 0$$

という特性方程式が導ける。これに上で求めた各剛性の値を代入することにより、次に述べるような安定限界線図が求められるのである。

研削における再生びりりの形態には、前述のように二種類のタイプが存在する。第1のタイプは、図9に示されるように砥石と被削材が接触を開始してから数秒あるいは数十秒のうちに急速に大振幅の振動に成長するものであり、これはドレッシング直後の砥石を使用した場合でも発生する可能性がある。第2のタイプは、ドレッシング直後の砥石では発生しないが、研削を続行して数分以上経過すると、しだいに成長してくる振動である。

再生びりりは、工具と被削材との間に生じた相対変位

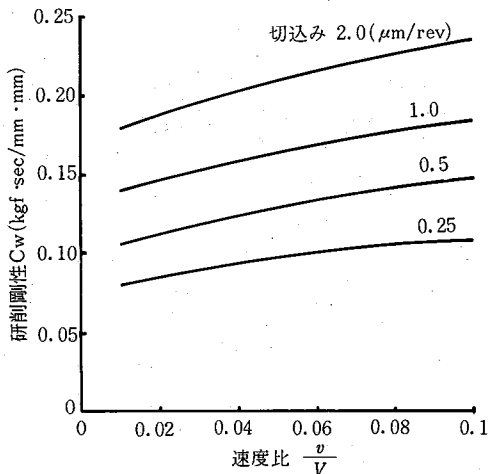


図8 円筒研削における研削剛性

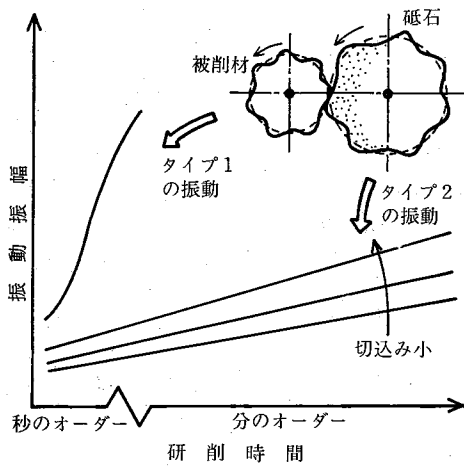


図9 研削における再生びびりの成長過程

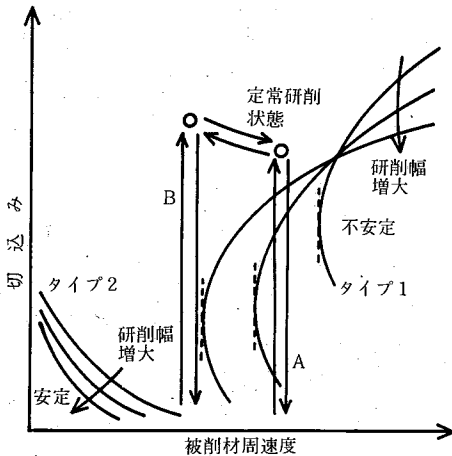


図10 円筒プランジ研削における安定限界線図

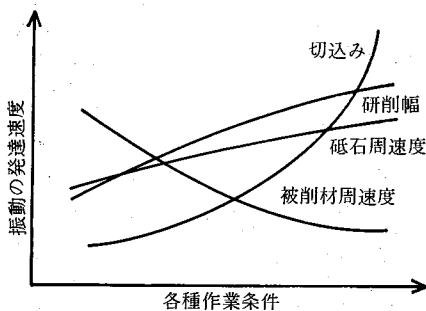


図11 円筒プランジ研削でのタイプ2の振動の発達速度におよぼす各種作業条件の影響

が被削材表面にうねりを形成し、これが被削材一回転後の切込み深さの変動として作用する現象が、その基本的な発生原因となっている。研削の場合には、このようなうねりが被削材表面のみならず、砥石作業面にも形成されることが、稲崎ら⁷⁾によって報告されている。すなわち

第1のタイプの振動は被削材表面の再生効果によるもので、第2のタイプは砥石作業面の再生効果によるものと考えられている。

円筒プランジ研削の場合の安定限界線図を描けば、図10のようになる。右側に描かれているのがタイプ1の場合で、被削材周速度が遅く、切込みが大きいときに系は安定となる。ただ図よりも明らかなように定常の研削状態のもとでは安定であっても、Aのように研削開始時やスパークアウト時の切込みが漸増、漸減する状態では、系は不安定となる。このような事態を避けるには、Bのように図10に示されている破線より左側の被削材周速度の低い領域を選択すればよい。

タイプ2の振動に対する安定限界線は、図10にて左側に示してある。通常の作業域では、このタイプの振動に対しては、ほとんど全て不安定であることがわかる。しかし図9にも示されているようにこのタイプの振動の発達速度は遅く、許容振動振幅に達するまで研削作業は続行される。このタイプの振動は砥石寿命に関係しており、この振動の発達速度が問題となる。図11に示されるように研削幅および砥石周速度が小さいほど、または被削材周速度が大きいほど、タイプ2の振動の発達速度が小さく、好ましい作業条件といえる。切込みについては、図9に示される砥石寿命までの総研削量を考慮に入れて、図11の結果とは逆に切込みの大きい方が結果的に有利となる。

再生効果を論ずるうえで、重複係数(または重畳係数)というものが問題となる。重複係数とは、切削でいえば切削幅のうち一回転後の切削時に再び切削される領域の幅の占める割合を意味し、再生効果の発生を考えるうえでなくてはならないものである。この重複係数を研削の場合において定義しようとすると、若干複雑となる。というのは研削は多刃であり、砥石全体として考えれば、重複係数が零であるような場合でも、砥粒レベルでは必ずしも零とはいえず、再生びびりが生じるのである。すなわち研削における重複係数を定義するにあたっては、砥粒レベルまで考慮にいれて確率的に示すか、または重複係数としては砥石レベルのものを示し、重複係数とは別に再生効果に直接関係をもつ係数を定義するか、どちらかに決める必要があると思われる。

5. 振動の抑制

研削の振動を抑制する方法として、現在非常に有効な方法というものは存在しない。問題としている振動の原因が前に述べたような再生効果であると考えれば、振動を抑制するには、加工中に工具あるいは被削材の周速度を周期的または不規則に変動させ、inner modulationとouter modulationとの位相差を刻々と変化させればよい。^{8),9)}しかし実際的には高い被削材速度の場合には効

果がないばかりでなく、低切込み下では常に安定な振動を生じ、意味をなさない。

研削盤の動特性を改善するのも一方法である。これには静剛性を高めること、構造の減衰性を高めることが考えられる。塩崎ら¹⁰⁾は研削盤に種々の設計変更を行い、

- (1) 主軸ヘッドとコラム案内面間の剛性の増大
- (2) 主軸静圧軸受部の剛性と減衰能の強化
- (3) 主軸自体の曲げ剛性の強化
- (4) テーブル静圧軸受部の剛性と減衰能の強化
- (5) テーブルとサドル間の3点支持結合部の剛性の増大

というような動剛性の改善を行っている。減衰性を高めるには各種ダンパを付加する方法が一般にとられる。ダンパには振動エネルギーの吸収を目的とする受動ダンパと逆に振動エネルギーを供給して振動を抑制する能動ダンパとがある。受動ダンパはある周波数の振動の抑制を目的としたもので、全ての振動を抑制することはできない。そうした意味では能動ダンパのほうが好ましいといえるが、現在優れた能動ダンパは存在せず、その開発はこれからの課題といえよう。工具と被削材との接触点近傍にバネ要素をいれることも効果がある。このためには結合度の低い、軟い砥石を使用すればよい。しかしこうした砥石は摩耗が早く、あまり好ましいとはいえない。より好ましい砥石の開発が現在試みられている。

また安定限界線図により、常によい安定な条件を選んで研削を行うようにすればよい。しかし、現在求められている安定限界線図は定性的なもので、特定の研削盤ではよくあっても、別の研削盤では全く意味をなさないものが多い。古川ら¹¹⁾はこうした意味で、心なし研削における振動の発生を適応制御によって防止しようという研究を行っている。自励振動の発生信号に対応して、被削材の回転速度を適切に変化し、振動が止まった時点で、再び初めの回転速度にもどす装置を試作している。

以上のように振動の探索技術は進歩しているものの、振動の抑制となると決まった方法がないのが現状である。

6. おわりに

研削における振動についての研究は多岐にわたっているものの、実際の振動を抑制するという点では、まだまだ不十分と考えられる。たとえば研削においては振動は常に存在していることから考えると、仕上げ粗さに影響を及ぼす振動振幅の割合というものを監視することが必要である。研削では前述のように重複係数が零になるところは確率的にしかありえないのであるから、根本から切削とは違った観点からアプローチすることも必要

と思われる。最近少しは研究がなされているが、振動特性を考慮した砥石の製作ということも必要と考えられる。砥石自体の動特性の研究というものはほとんどなされていない。

振動の発生機構もよくわかっていないことの一つである。R. S. Hahnが研削の分野に再生効果の考えを打ちたてて以来、全てが再生効果によるもののように考えられているが、研削では重複して切削することが、メカニズム上しごく当然のことであるので、それほど重大な意味をもたないものと考えられる。また解析のやり方というものも一辺倒で、砥石軸のねじり振動や研削方向とは垂直な方向の曲げ振動、ふれまわり等については十分解析されていないのが現状である。

解析結果を実際にかすためには、安定解析が定性的だけでなく、定量的に信頼しうるものでなくてはならない。研削が確率的なものである以上、定量的に信頼しうる結果を得ることは、非常に困難と思われる。こうしたことをBlack Boxとした解析、制御の方法を考えていくのも一方法と思われる。(1982年1月11日受理)

文 献

- 1) R. Snoeys: Contribution to the Gyroscopic Effect in High Speed Grinding Shaft, Proc. 6th MTDR (1965) 525.
- 2) R. Snoeys, D. Brown: Dominating Parameters in Grinding Wheel- and Workpiece Regenerative Chatter, Proc. 10th MTDR (1969) 325.
- 3) 古川・宮下・塩崎: 心なし研削におけるびり振動 (第1報), 日本機械学会論文集, 36, 282 (昭45-2), 328.
- 4) 牧野・鈴木: 研削びりの実験的追求, 精密機械, 39, 1 (昭48), 113.
- 5) 塩崎・宮下・古川: 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, 36, 281 (昭45-1), 143.
- 6) 米津・稲崎・柴田・清水: 研削におけるびり振動と形状精度, 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, (昭49-2), 298.
- 7) I. Inasaki, K. Tonou, S. Yonetsu: Regenerative Chatter in Cylindrical Plunge Grinding, Bulletin of the JSME, No. 150 (1977), 1648.
- 8) B. Bartalucci, G. Lisiri, P. C. Pinotti: Grinding at Variable Speed, 11th MTDR Conf., (1970), 633.
- 9) I. Inasaki, C. Cheng, S. Yonetsu: Suppressor of Chatter in Grinding, Bulletin of the JSPE, 9, 5 (1976) 133.
- 10) 塩崎・古川・森元: 動剛性改善による回転テーブル型平面研削盤のびり振動の抑制, 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, (昭49-2), 275.
- 11) 古川・塩崎・志賀: 自励振動発達の抑制機構 (第1報), 精密機械, 39, 4 (昭48), 448.