衝撃加振時のバイト振動と工具摩耗の 相関性に関する研究*

村 田 良 司** 小 久 保 邦 彦***

Correlation between Flank Wear and Tool Vibration Excited
by a Diagnostic Impulse in Machining Process

Ryoji Murata and Kunihiko Kokubo

For finding new in-process monitoring methods of tool function, the present paper treats about constraint effects of tool wear on transient vibration generated by calibrated force in turning operations. The definite impulse force in feed direction is made by hammering on the side face of the tool with a pendulum. The impulse is always calibrated with a piezoelectric force sensor located on the hammer. The tool vibration is detected with an acceleration sensor. The power-spectrum of the transient vibration is carefully examined for seeking correlation with flank wear. Similarly, impulse in power-force direction is also tested. Major findings of the study are as follows : 1) The first mode of resonance frequency f_1 of the tool is mostly dominant in the power-spectrum, and the amplitude of f_1 has fairly close correlation with flank wear. 2) Correlation between vibration in power-force direction and flank wear is also verified. 3) It is confirmed that the effect of the impulse on the machined surface is negligibly small.

Key words: flank wear, in-process sensor, transient vibration, diagnostic impulse, vibration analysis

1. ま え が き

切削加工システムの高度自動化のためには、工具摩耗の自動監視システムが不可欠である。このようなシステムの確立に寄与するため、種々のインプロセス工具摩耗センサが提案され、多くの研究がなされてきた¹⁾²⁾。これらはそれぞれ興味ある成果をもたらしたが、なお原理的にも現象的にも確実なセンサ方式がなく、まだまだ研究の積み重ねが必要な状況にある。本研究は「切削中の工具に微小振動を与え、そのレスポンスから工具の摩耗状況を推定しようとする研究」の一環であるが、本報ではまずこの方式の可能性を検討する。

2. 序 論

バイトホルダに固定されたシャンクは、非切削時（非切込み時）には一端固定・他端自由の片持ちはりともみなしうる。又、切削時には切れ刃部は被削材と結合するので、工具に何らかの拘束があるが、この拘束は基本的には塑性的な拘束であって振動を直接抑制するものではない³⁾⁴⁾。しかし、工具摩耗が発生した場合には弾性的、摩擦損失的な拘束が増加するので工具の振動が抑制されるものと考えられる。例えば、バイトに送り方

向から衝撃を加える場合、バイトは送り方向に振動するわけであるが、逃げ面摩耗の増大にともない逃げ面摩耗痕と被削材との接触している面積が大きくなり、接触損失が増す。この損失によって、バイトの1次モードの振動に相当する成分は相応して小さくなる。さらに、バイトを主分力方向に加振するときでも、逃げ面摩耗が発生している場合には逃げ面摩耗痕の面積に比例する力が作用し、やはりバイトの振動は抑えられると考えられる。

本研究は以上の見地に立って、主として実験によって現象を分析し、衝撃加振時のバイト振動と工具摩耗の相関性を明らかにしようとするものである。また、逃げ面摩耗がある程度をこえて増加すると、条件によってはびびり振動を発生する場合もありうるが、本研究ではこのような切削条件は対象としない。なお本報の実験範囲では、いわゆるびびり振動を全く認めなかった。

3. 実 験 方 法

バイトに送り方向から衝撃を与える実験装置の概要を図1に示す。この装置は、振り子式のハンマによってバイトに衝撃力を与える仕組みとなっている。ハンマは一度衝突した後に、跳ね返って再衝突するが、二度目以降の衝突による力は一度目の衝撃力と比べて十分に小さく、また再衝突するまでの時間に比べFFTのデータ取込み時間（10ms）を短く設定するので測定データには影響を及ぼさない。衝撃力の大きさはハンマの振り上げ角によって自在に調節することができ、与えた衝撃力

* 原稿受付 平成5年5月25日

** 正 会 員 東京理科大学理工学部（野田市山崎2641）

*** 正 会 員 シチズン時計（株）（所沢市下富840）

Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Cutting conditions

Tool	Carbide P20(0,6,5,6,15,15,0.8)
Material cut	0.35%C (Carbon steel)
Cross section of shank	19×19mm
Tool extension	30mm
Depth of cut	0.5-2.0mm
Feed	0.05-0.15mm/rev
Cutting speed	80-140m/min
Cutting fluid	Dry

の大きさはハンマに内蔵されている圧電式のセンサによって測定することができる。

工具はP20スローアウェイチップを用い、切れ刃部に、研削によって任意の人工逃げ面摩耗を付けたものを数種類用意した。なお摩耗部の当たりを良くするため実験前に、通常の自然摩耗痕が確認できるまで、十分に慣らし切削を行った。図1において、バイトは主分力、送り分力方向とも強固に固定されている。実験条件は表1に示す通りである。

切削中のバイトCに図1に示した装置で送り方向から衝撃を加え、生じた過渡振動を加速度計Aによって検出する。その出力信号をFFTによって分析する。検討は主としてバイトの1次モードの固有振動数に相当するピークf1(図3参照)について行った。なお、本実験での非切削時の信号の安定性は0.5dB程度である。

4. 送り分力方向に衝撃加振したときの実験結果

4.1 摩耗幅の増加に対する波形の変化

図2、図3は加速度信号の波形とそのスペクトラムの摩耗幅による変化を例示したものである。図2において非切削時に加振した時の過渡振動と切削中に加振した波形を比べると、切削中の方が減衰効果が大きくなっているということが分かる。また、過渡振動の振幅が多少ビートを起こしているのはバイトの送り方向の振動の一次モードの固有振動数と主分力方向のそれが極めて近いためである。

図3において、バイトの1次モードの固有振動数に相当する周波数f1の振幅は、摩耗幅の増加によって小さくなって行くことがわかる。また、ピークf2は摩耗の増加によりスペクトラムのパワーの中心が周波数の高い方へ移行した結果、隆起したピークである。

4.2 加振力を変化させたとき

加振力によって摩耗幅と振幅との相関性がどのように変化する

Fig.2 Examples of wave-forms

Fig.3 Effect of flank wear on spectrum

Fig.4 Effect of exciting force

Fig.5 Relationship between exciting force and Afl, Anc

Fig.6 Effect of depth of cut

Fig.7 Effect of feed

Fig.8 Effect of cutting speed

るかを調べた結果を図4に示す。図の縦軸の振幅は、切削中の f_1 に相当する振幅値 Af_1 を、切削していないときの f_1 (これを f_{nc} とする) の振幅値 Anc で除し、無次元化したものである。図から加振力の増加に対して振幅比は多少増加するが、同時に加振力が十分小さいときもやや増大する傾向が認められる。このような現象を引き起こす原因について考える。非切削中のバイトを衝撃加振した時の加振力と振幅 Anc との関係(図5)をみると、加振力がある程度以上大きくなるにつれて Anc は加振力に対して線形ではなく、多少飽和的な挙動を示す。なお Af_1 は実験範囲ではほぼ線形であった。したがって、加振力が大きくなると振幅比が見かけ上増加するものと解釈できる。さて、一般に Af_1 は加振力に比例的な過渡振動と、加振力に無関係な加工中のノイズに含まれる f_1 の成分との和である。これに対し、 Anc は加振力比例項(加振力小の場合)のみであるから、加振力が十分小さくなると、振幅比 Af_1/Anc が再び大きくなるものと考えられる。しかし、加振力が小さくなると、加工に伴うノイズ項の影響が大きくなるため、摩耗幅による Af_1 の変化も測定しにくくなると考えられる。

本研究の目的には、ノイズの影響を受けにくく、かつ加振力と振幅 Anc がほぼ線形性を示す加振力のレベルが適当である。したがって、以下、1100Nの加振力で実験をおこなう。

4.3 切削条件を変化させたとき

次に、切削条件を変化させたときの逃げ面摩耗幅とバイト振幅比 Af_1/Anc との関係を調べた結果を示す。

図6は切込み量を変化させたときのものである。切込み量が大きくなるにつれて振幅のレベルは小さくなることがわかる。これは、切込み量が増えると、摩耗幅が同一であっても被削材と逃げ面の接触する面積が増え、バイト振動系の剛性と損失が大きくなるためであると考えられる。また、すくい面での切りくずとの摩擦力が、切込み量の増加によって増し、減衰効果が増すことも考えられる。しかし、図7から送りの影響を受けにくいことが分かるので、すくい面の摩擦力による減衰効果は小さいと言える。

図7は送り、図8は切削速度をそれぞれ変化させたときのグラフである。これらの図より、送りを変化させたときや、切削速度を変化させた場合、振幅比 Af_1/Anc には大きな変化はみられない。

以上より、 f_1 の振幅と摩耗幅との相関性は、送り量や切削速度に依存しないが、切込み量によりかなりの影響を受けることが確かめられた。

 Fig.9 Relationship between width of flank wear and Af_1/Anc

4.4 相関関係の近似式

図9は切込み1mmにおける摩耗幅と f_1 の振幅比との相関性を示したものである。この図より各データは全体として一定の関数関係にあるものと考えられる。べき乗関数モデルをあてはめて、この相関関係を近似したとすると

$$Af_1/Anc = 0.245VB^{-0.144} \quad (1)$$

の近似式が得られる。この場合の相関係数*は $r = -0.849$ である。よって、摩耗幅と f_1 の振幅比の間には強い相関性が認められることがわかる。

過渡応答のスペクトラム(図3)より、摩耗幅の増大に対しても f_1 の値はあまり変化しないことが分かる。しかし、摩耗幅が大きくなるにつれて、 f_1 はわずかに増加する。これは接触剛性の増加による影響と考えられる。また、スペクトラムの最大値をとるピークは f_1 より大きな周波数へと移っていく。すなわち、過渡振動の主なパワーが f_1 より高い周波数帯域へ移行してきていることを示している。この傾向を量的に評価するため、9000Hz付近の目立ったピークを f_2 とし、 f_1 との振幅比 (Af_1/Af_2) に着目して、逃げ面摩耗幅の増加による変化を示したものが図10である。なお、摩耗幅が0.4mm以下のときは、 f_2 が顕現していないが、その場合9000Hz付近の値をとった。またこの場合、切込み1.5mm以上において、強い相関性がみられるので、図は切込みが1.5mm以上のデータを示してある。

* 近似式が直線になるような関数グラフ(上式の場合は両対数グラフ)上における相関係数を言う。

Fig.10 Relationship between width of flank wear and $Af1/Af2$
Cutting conditions are same as Fig.9

Fig.11 Relationship between width of flank wear and f_m

指数関数モデルによりこの相関関係をあてはめると

$$Af1/Af2 = 2.02 \exp(-2.11VB) \quad (2)$$

なる近似式が得られた(但しこの場合の相関係数は $r = -0.912$ である)。

4.5 周波数による摩耗幅推定

逃げ面摩耗幅の増加を、バイト逃げ面と被削材との接触の増大によるピーク周波数の変化から推定できるか否か検討した。通常、バイトを衝撃加振したときの過渡振動のスペクトラムを見ると、加工に伴うノイズの影響や刃物台の共振等により複数のピークが複雑に発生するので、そのままでは特定の周波数のわずかな増加を正確につかむことが困難である。この場合、ノイズの影響は時間的にほぼ一定であるが、過渡振動は急速に減衰する。そこでノイズ等の影響をなるべくさけるため過渡振動の初期振幅(ここでは3サイクル分とする)のみを取ってフーリエ変換して検討する。そのスペクトルの最大ピークの周波数 f_m と摩耗幅との関係を図11に示す。 f_m の増加量は大きくはないが、逃げ面摩耗幅におおむね比例的に増加することが明らかである。また同図から各切込みにおいて、摩耗面積(摩耗幅×切込み)が同じならば、周波数 f_m はほぼ同じ値になることが分かる。

なお、周波数 f_m は、信号取込み時間が短い(6kHzの場合、0.5ms)ため、周波数分解能が多少阻害されるのでスペクトルの最大ピークの周波数 f_{max} そのものを正確に表現するものではない。これは、むしろ、ささいな f_{max} の変動にとらわれない平均的な変化を示している。つまり、 f_m が漸増することは、逃げ面摩耗幅の増加に伴って、振動のパワーが次第に高周波域に移行することを示している。このことは、4.4項で

Fig.12 Experimental apparatus

Fig.13 Relationship between width of flank wear and $Af1/A0$

述べた事実と同様な結果である。

本項のようにスペクトル自体の最大ピークの周波数 f_{max} によらず f_2 (4.4項)、 f_m (4.5項) を対象として検討した理由は、自動的な工具寿命判定に応用する場合の便宜を考えたからである。

すなわち、 f_{max} は定義としては明確であって、はっきりしているが、実験的には種々の原因から複雑な変遷をする可能性がある。かつ、その値は事前には当然に未定であるから、その周波数を対象として自動判定回路を構成する場合には困難がある。

これに対し、 f_2 はある程度ア priori に定めておくことが可能であるので判定回路などの構成がそれだけ容易である。また、実験的に見て、 f_m はノイズの影響が比較的少ない等の利益があると考えられる。

以上のことより、周波数変化との関係によっても摩耗幅が推定できる可能性があると考ええる。

5. 落球テストによる結果

主分力方向の加振についても実験を行った。図12に実験装置を示す。

この実験において、バイトの突出し長さは横方向加振の場合と同じで、質量30gの鋼球Bを決められた高さから落下させ、バイトCの振動を見ようとするものである。鋼球を落下させる高さは約60～460mmの範囲で行った。

前出の送り分力方向の実験と同様にバイトの振動は加速度計によって検出され、FFTにより解析を行う。また鋼球は一度衝突した後、跳ね返って再衝突を起こす。しかし、再衝突を起こすまでの時間は、FFTのデータ取込み時間(10ms)より

Fig.14 Effect of impulse on surface roughness

り十分に長いのでデータに影響を与えることはない。ここで、衝撃力の大きさは、バイトに鋼球を落下させたときにできる圧痕の大きさと鋼球の反発係数を測定することにより見積もった値である。なお、本実験での信号の安定性は非切削時で0.5dB程度である。

この実験において、加振力が大きすぎると、仕上面に与える損傷が問題となるおそれがある。また、加振力が小さすぎる場合には加工中に発生するノイズの影響などにより、摩耗幅による f_1 の振幅変化が測定しにくくなる。

以上のことを考慮した結果、加振力が5000Nの 때가適当であると考えられたので、この加振力について実験をおこなった。

逃げ面摩耗幅と f_1 の振幅との相関性を示したものを図13に示す。この図を見ると摩耗幅が大きくなるにつれて振幅比が徐々に小さくなる傾向が見受けられる。二次関数モデルを用いてあてはめを行った場合、

$$Af_1/A_0 = 1 + 0.365VB - VB^2 \quad (3)$$

となり、相関係数は $r = -0.760$ となった。なお A_0 は $VB = 0$ の振幅である。このことより主分力方向の加振においても、逃げ面摩耗幅とバイトの1次モード f_1 に相当する振幅との間には、一応の相関性がみられると言える。

6. 加振の仕上面に対する影響

切削中のバイトを加振することにより仕上面にどのような影響を及ぼすかについて述べる。

本実験において衝撃力を送り分力、主分力方向から加えたが、肉眼により確認した結果、仕上面に与える影響は認められない。

また、衝撃を加えることによりチップに欠損などが発生することもない。

さらに、加振による仕上面の粗さへの影響を調べるために、表面粗さを調べたものを図14に示す。図の(a)、(b)はそれぞれ送り分力方向、主分力方向に加振したときのものである。加振条件は本実験において相関性が強く確認できた条件についておこなっている。この図を見ると、最大粗さ R_{max} は加振したことによって、非加振時に比べ大きくなるということはない。

以上から、本実験の範囲内においては、送り分力方向、主分力方向ともに工具を加振したことによる表面粗さへの影響は認められない。

7. 結 論

本実験より以下の結果を得た。

- (1) バイトを送り分力方向に衝撃加振した際のバイトの1次モードの振動と逃げ面摩耗幅の間には強い相関性があり、これから逃げ面摩耗幅の推定が可能と考えられる。その相関性は加振力、切込みの影響を受け、送りや切削速度に影響されない。
- (2) バイトを主分力方向に加振した場合も、本実験の範囲内において相関性を確認することができた。
- (3) 本実験の範囲内では加振による仕上面への影響は全く認められない。

本研究の実験を担当された山本正弘氏（本学卒研究生）に感謝する。

本実験で、表面粗さを測定するにあたってご助力頂いた小坂研究所の小美濃氏、荒木氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) G.F.Micheletti, et al.: In Process Tool Wear Sensors for Cutting Operations, Ann.CIRP, 25, 2 (1976) 483.
- 2) 上原 邦雄：切削加工用センサ，日本機械学会誌，89, 9 (1976) 1084.
- 3) 中山一雄, 新井 実, 奥野耕司：切削工具摩耗のインプロセス測定, 昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会前刷, (1977) 102.
- 4) 村田良司, 大島郁也, 前川克廣：切削工具の加振特性と工具損傷, 1990年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1990) 821.