圧電素子を用いた切削動力計の研究*

山本 明** 前田良昭** 板本宗一*** 峰 直毅**** 井上雄次*****

Study on a New Tool-Dynamometer of Piezoelectric Type

Akira YAMAMOTO, Yoshiaki MAEDA, Shūichi ITAMOTO, Naoki MINE, Yūji INOUE

For the further experimental analysis of metal cutting dynamics, a new tool-dynamometer of piezoelectric type has been developed. In this dynamometer, the cutting edge block is mounted on the top of the tool shank through two piezoelectric elements-Lead Titanate Ceramics-having a good high frequency response and heat-resisting, and by which the cutting force components are picked up independently of the tool displacement. Therefore, this dynamometer can measure these force components strictly even under the tool-vibration.

Results of the basic investigations of this dynamometer characteristics show a good linearity and a better high frequency response than the force-displacement type dynamometer generally used today. The cross-talking between its outputs, so bad in those made in the earlier stage, has been improved so low as to give few disadvantage. Besides, some metal cutting experiments with this dynamometer indicates that some interesting correspondences are observed between the cutting force variation and the tool displacement under dynamic cutting conditions and that so called the cutting speed coefficient of dynamic cutting force, which is usually estimated from the data under stationary cutting states, can be measured directly under dynamic cutting states. Like these, this dynamometer may be expected to clarify the unknown fields of metal cutting dynamics.

1. 緒 言

切削現象を取扱う上で重要な状態量の一つである切削抵抗の測定に関しては、種々の検討がなされており、各種の切削動力計が報告されている。これらのうちもっとも広く一般に用いられているものは、バイト自身もしくはホルダの弾性変形量を測定することにより切削抵抗を求める方法である。しかし、この種のものでは慣性力、減衰の影響を無視できない動的状態での測定には問題があり、たとえばバイト系が振動状態にあるような場合、バイトの振動変位と切削抵抗変動の間の位相差を知ることができないほか、周波数応答帯域も狭く1 kHz程度以下に限られることが多いなどの欠点を持つ。近年、びびり振動に関する研究が進むとともに、動的諸現象の検討の必要性からこれらの点を改善した切削動力計の開発が望まれるわけである。

そこで、筆者らはこの一方法として圧電素子に注目し、これを介して切れ刃部分とバイト柄部分とを独立させ、バイト変位と別個に切削抵抗をとらえ、バイト系が

振動状態にあるようなときにも厳密な切削抵抗変動を測定することのできる切削動力計を考案試作したので、この特徴と応用結果について報告する。

2. 試作動力計の原理

圧電素子は特性の著しく改善されたものが出現するに伴って、変換器としての有利な特徴がとりあげられ、各種の分野で広く応用されるようになった。切削動力計への応用としては、古くは戦前、水晶板を用いた大越式(理研式)切削動力計¹⁾などがみられるが、その扱いのわずらわしさに原因してか、他の測定原理に基づくものが多く使われるようになり、その後の応用例はほとんどみあたらない。しかし、最近の圧電素子の発達に伴って再び切削動力計への利用が試みられるようになった²⁾。しかし、これらは弾性変形量が少なく、周波数特性の良好なことを特徴とするけれども、その原理的構成は一般に用いられる弾性変形式動力計と変わらず、バイト変位と力の位相差をとらえることのできないものであった。

ここで報告する動力計は図1に示すようにバイト切れ刃部分をブロックとして独立させ、これを圧電素子を介してバイト柄部に取付けたもので、各圧電素子に発生する圧電圧 E_1 , E_2 から切削抵抗(以下では切削力とよぶ)分力 F_c , F_t を測定する*。したがって、バイトの変形を介することなく刃先に作用する切削力を測定することが

*原稿受付 昭和47年3月11日。昭和46年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和46年11月5日)にて発表。

**正 会 員 大阪大学基礎工学部(大阪府豊中市待兼山町)

***学生会員 大阪大学大学院

****正 会 員 日立金属(株)(三重県桑名市大福)

*****正 会 員 住友金属工業(株)(茨城県鹿島郡鹿島町)

(1号～4号)を試作した。図2に示すのは、ほぼ満足な性能を得た4号動力計である。ここでは、この4号動力計を中心に試作動力計の仕様を紹介し、試作にあたっての問題点について述べる。

図2にみるように、試作した動力計ではいずれも実験目的に応じて切れ刃（とくにレーキ角）とチップブレイカの形状を自由に選べるよう、スローアウェイ・チップ①をチップ台座②にクランプして保持する型式とし、圧電素子はチップ台座とバイト柄部（あるいは動力計ベース⑨）の間に配置してある。圧電素子のチップ台座およびバイト柄部（動力計ベース）への組付け結合は、初期の試作器（1号、2号）では接着剤によっていたが、この方式では主分力用、背分力用両素子に均等のプレロードを負荷することが困難で、検出特性の悪化、さらには接合面の接触状態の不均一性に原因する素子の破損も起こりやすいため、図のように両素子に対して45°の角をなすボルト⑩を用いて組付けとプレロードの負荷を行ない、補助的にシアン系瞬間接着剤を用いる方式に改善した。この効果は図3に示すようである。

さて、試作にあたってもっとも問題になったのは、このような構成では刃先に切削力が働いたときチップ台座ブロックが回転ゆすり運動をすることによって、主分力、背分力両出力間の直交性が一般に悪くなることで、初期の試作器では干渉率が40～100%にもなった。この宿命的ともいえる状態をできるだけ改善するため、チップ台座ブロックの形状や圧電素子の寸法、配置位置などを試行的に検討してきたが、4号動力計では図2のように新しくチップ台座ブロックに支持脚⑦、⑧を付け、その位置を調整することによって、ゆすり運動の2支点が各圧電素子の受圧面中心に一致するようにした。この結果、図7に示すように干渉率は動作周波数帯域のほぼ全域で10%以内に低減された。

その他、圧電素子を含む切れ刃ブロックを検出器と考

(3号動力計・主分力方向加振時)

図3 プレロード負荷による検出特性の改善

えるとき、基本的構成（図1）のようにバイト柄部と一体としたのではバイトを取りかえるときの汎用性と経済性に欠けるので、新しい動力計では切れ刃ブロックと動力計ベースからなる動力計部分をバイト柄部から独立させた仕様とし、種々のバイト柄部に組込んで使用できるようにした。また、圧電素子の用い方としては図1のように主分力用、背分力用に各1枚ずつを用いる基本的な方式と4号動力計（図2）で採用した各2枚ずつをはり合せて用いる、いわゆるバイモルフ方式とがあるが、感度の点、また素子相互間の絶縁など取扱いの容易な点で後者のほうがすぐれているようである。

4. 試作動力計の特性

動的な状態での使用を考慮した動力計では静的特性（出力と力の較正）のほか、動特性、たとえば周波数特性（ゲイン特性と位相特性）を知る必要がある。この特性試験法としては二、三の方法が考えられるが、ここでは図4に示す実験装置を用いて、付加質量を利用した周波数応答実験を行ない、動特性を調べることにした。すなわち、切れ刃ブロックの代りに付加質量 m を取付けた動力計を加振台に固定して、主分力方向および背分力方向に加振し、 m の慣性力によって任意周波数の変動力を圧電素子に作用させる。実験は m の加速度 a を一定とし

図4 動力計動特性実験装置

て加振周波数を連続的に変化して行ない、動力計の出力電圧 E_1 , E_2 および α をトラッキングフィルタ (ろ波幅 ± 2.5 Hz) を内蔵した振動解析装置 (明石製作所 AVA-1) によって解析した。なお、実験にあたって動力計に切削時と同じ状態で力が作用するよう、付加質量 (取付けた加速度ピックアップも含めて) の重心点の位置が切れ刃相当位置にくるよう配慮した。また、圧電素子の出力インピーダンスが高く、測定回路定数 (圧電素子の出力インピーダンスおよび測定器の入力インピーダンス) で決まる低域遮断周波数が 2 kHz 以上になるので、これによる低域特性の悪化を防ぐため、4 号動力計に対しては専用の前置増幅器 (明石製作所 TAK-16 HT) を用いた。

このようにして得られた 4 号動力計の特性の一例を図 5～図 7 に示す。図 5 は周波数応答特性であるが、ゲイン、位相とも 20～1500 Hz の広域にわたってほぼ平滑な特性を示している。また、図 6 からわかるように直線性も十分良好である。図 7 は干渉率の周波数特性で、先に述べたように動作周波数帯域のほぼ全域で 10% 内におさまっている。なお、干渉出力はチップ台座ブロックの回転ゆすり運動に起因する結果、その位相は図 5 にみるように加振方向出力に対してほぼ 180° ズれている。

5. 試作動力計によるびびり振動の観察

一般に機械工作におけるびびり振動は工作機械の構造

図 5 4 号動力計の周波数特性 (主分力方向加振時)

*使用した寸法の MLT 圧電素子では静電容量が 10～80 pF、したがって 1 kHz の信号に対しては、ほぼ $2 \times 10^6 \sim 10^7 \Omega$ の出力インピーダンスを有している。

図 6 4 号動力計の入出力特性

図 7 4 号動力計の干渉特性 (主分力方向)

のもつ動特性と切削過程の動特性に原因する二つの問題にわけて考えられている。このうち、前者に関する研究が理論、実験両面からかなり進んでいるのに対し、後者についてはかなり遅れがみられ、とくに実験的研究は少なく、実際についてはまだ不明な点も多い。この原因の一つとして、緒言で述べたように適当な切削動力計がなかったことがあげられる。この圧電型切削動力計の試作をはじめた主な目的も、この点すなわち切削過程の動特性を検討することにある。これで得られた動特性については十分な検討が進んだ時点で報告する予定であるが、ここでは試作動力計の応用例という意味で、一、二の実験結果を報告する。

図 8 はびびり振動におよぼす切削速度変動の効果を検討するための実験装置である。現象を単純化するために、機械構造や加工物を含む主軸系の相当剛性に比べて、バイト系のそれを小さくし、かつバイトが主分力方向にのみ振動するようにエデンばねを利用したスプリング・シャンク ($l=10 \sim 60$ mm に対して、共振周波数 $f_0=790 \sim 200$ Hz) を用い、これに 4 号動力計を組込んでいる。さらに、再生効果を生ぜず二次元切削が行なえるよう、S 50 C, 200 ϕ の鋼材にピッチ 7 mm の角ねじを切った被削材を旋盤主軸に取付け、その良好な仕上面をもつねじ山部 (幅 2.5 mm) を乾式切削した。

図 9 はその観測波形の一例である。厳密には、干渉成

図 8 切削速度変動効果実験装置

2次元乾式切削: すくい角 0° , にげ角 6° 平均切削速度 $V_0 = 100 \text{ m/min}$
 びびり主振動数: $f = 260 \text{ Hz}$ (バイトつき γ 量 $l = 45 \text{ mm}$)

図 9 観測波形例

分の影響を考慮すべきで, E_1, E_2 の波形をそのまま主成分変動, 背成分変動として取扱うことは若干問題もあるが, 従来測定できなかったバイト変位*の変動と切削力変動の間に生ずる位相差が明確にとらえられている. また, バイト変位に対応する α の変動に比べて切削力変動は多くの周波数成分をもつ複雑な波形を示している. すなわち, 一般に切削力変動にはバイト変位の変動周波数に一致した成分が優勢であり, 両波形はみかけ上 1:1 の対応をしているものが多いが, かなり高周波の成分が重畳しており, なかには図(b)に示すように, Arnold⁴⁾が予想した波形に類似したもの, すなわちバイトの変動周波数の 2 倍の周波数成分をかなり明確に含んでいる波形も観測される.

図 10 はこのようなデータの解析結果の一例で, びびり振動におよぼす切削速度の変動効果と平均切削速度の関係を示している. 先の例のように, びびり振動に関して得られる実験データには複雑なものが多いので, 解析にあたっては図 8 に示すようにトラッキング・フィルタを用い, 注目したい周波数成分のみをとりだし, さらに動力計の諸特性 (図 5 ~ 図 7) を記憶させたデジタル計算機によって, 干渉成分および位相の補償を行なって検討を進めた. さて, 図 10 の上図で縦軸にとっている k_3

にげ角 $\gamma = 6^\circ$, 平均切取り厚 $S_0 = 0.17 \sim 0.21 \text{ mm}$
 びびり主振動数 $f = 315 \text{ Hz}$

図 10 平均切削速度の切削速度変動効果への影響

*バイト変位は同位相にある加速度 a によって代用してある.

k_3 はいわゆる切削速度係数^{5)*} で切り厚みおよび切込み送り速度が一定のときの切削力変動と切削速度変動の振幅比 (インピーダンス) で定義され、また下図の ϕ_3 は両者の位相差である。従来、これらの値は静的切削 (定常切削) におけるデータから推定されるにすぎなかったが、試作した動力計を用いることによって、このように動的な実験からこの値を知ることができるようになった^{**}。この結果によれば、 k_3 は主分力方向、背分力方向ともにほぼ同じ値で、平均切削速度が増加すると減少する。すなわち、切削力の dv による変動振幅は減少する傾向にある。

6. 結 論

切削過程の動特性の実験的解析に役立てる目的で、切削力と変位を別個に測定できる動力計を圧電素子を応用して試作し、特性試験によって基礎的な諸特性を検討するとともに、実際に切削実験も行なって実用性なども検討した。得られた結果はつぎのとおりである。

*切削力変動は一般につぎのように切り厚み変動、切込み送り速度変動、切削速度変動の影響の和として表わされる。

$$dF = k_1 ds + k_2 dr + k_3 dv$$

**本研究では図 8 に示す実験用バイトを用いて、切り厚み、切込み送り速度が一定 ($ds=dr=0$) の条件下で動的切削 (びり主振動数 f) を行ない、切削動力計および加速度計の出力 E_1 , E_2 , α からびり主振動成分について切削主分力、背分力の変動分 $(dF_c)_f$, $(dF_t)_f$ および切削速度の変動分 $(dv)_f$ を求め $k_3 = (dF/dv)_{ds=dr=0}$ の関係から $(k_3)_f$ を知る。

(1) 試作した動力計はびり時において振動状態の異なる切削力と変位を別個に測ることができ、従来の動力計に比べて周波数特性もすぐれている。また、直線性も良好で、直交性もほぼ満足できる範囲にある。

(2) 実際に切削実験を行なってびり振動を観察した結果、切削力の変動はバイト変位の変動周波数成分以外の周波数成分も含んだ複雑な様子を示し、なかには Arnold が予想した状態と似た様相を示すものもみられた。

(3) また、ここで行なった応用実験では、従来静的な切削データから類推されるにすぎなかった切削速度係数を動的条件下で直接知ることができた。

終りにあたり、本研究に協力された本学、中村 示氏ならびに圧電素子の応用について多大の技術的援助を受けた松下電器産業 K.K. の池上、上田両氏に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 大越 諄: 理研彙報, 10 (1931) 225.
- 2) G.E. Micheletti ほか: Int. J. Mach. Tool. Des. & Res., 10 (1970) 305.
- 3) 上田, 池上: National Technical Report, 15, 6 (1969) 643.
- 4) R.N. Arnold: Proc. Inst. Mech. Engr. 154, 3 (1964) 261.
- 5) S. A. Tobias: Machine Tool Vibration, (1965), Blakie, Chap. IIA.1. [米津・下郷訳, 工作機械の振動, (1969), コロナ社].