

3次元切削動力計の設計と試作

大島 貴充* 渡辺 修*

A Trial-Setup and Design of Three-dimensional Cutting Force Dynamometer

Takamitsu OSHIMA Osamu WATANABE

要 旨 切削抵抗検出部の動剛性が大きくなり、各々の検出器の相互干渉が、できるかぎり少なくなる構造をもった、微小切削抵抗測定用の、3次元切削動力計の1号機を試作した。この試作機の基本構造と、特性及び切削実験の結果を報告する。

緒 言

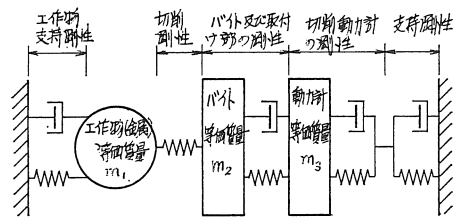
切削動力計は、現在、いろいろの型式のものが存在する。しかし、使いやすさからいって、歪ゲージを用いたものが一番多い。この方式は、検出部に機械的変位が必要になり、検出部の動剛性のいかんによっては、実際の切削状態とはかけはなれたものになる。また、3次元的に切削分力を検出する場合、動力計の構造上、各々の検出器相互に干渉が生じて、切削分力を十分に検出していない。とくに微小な力を検出する場合には、これらの問題を解決しないかぎり、実際の切削抵抗に近い値を検出することは不可能である。そこで我々は、微小切削抵抗用3次元切削動力計の基本構造を求めて、旋盤用の切削動力計・第1号機(L.D48型)を試作して、試作機により、切削実験を行なった。その結果をもとにして、動力計の基本構造を検討した。

旋削加工系

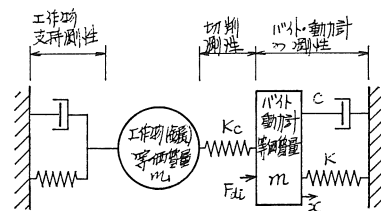
動力計を挿入した旋削加工系は、一般に第1図のように表わすことができる。動力計の挿入により、バイトの支持系が異なり、一般の旋削のときの切込み量との間に相異が生ずる。この相異は、根本的な支持系の相異からくる問題であり、さけることはできない。しかし、動力計の剛性を切削剛性よりはるかに大きくすることにより、誤差をすくなくすることができる。

第1図の加工系は、バイトを動力計の一部に固定する構造にすれば、第2図のように単純化される。

第2図において、動力計の検出部の剛性を K 、動力計の粘性係数を C 、切削剛性を K_c とする。設定切込み量に対する切残し率 K_s は



第1図 切削加工系



第2図 単純化された加工系

$$K_s = \frac{K_c}{K_c + K} \quad (1)$$

となり、 K_s を小さくするには、 K をできるかぎり大きくしなければならない。 $K_c \approx K$ であれば $K_s = \frac{1}{2}$ となり、50%の切残しができることになる。従って、動力計の剛性 K の大半が、検出器の剛性で支配されるので、検出部の剛性は、十分に大きくとらなければならない。

次に、加工系における信号の伝達を考える。

$K \gg K_c$ で、 K_c による復元力が無視できる場合。

第2図において、切削力 F が生じ、 $F \approx F_{ci}$ なる力 F_{ci} でバイトの先端がおされ、 x なる変位が生じた。このとき、動力計は力 F_{a0} を検出したとすると、

* 機械工学科

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = F_{di} \dots\dots\dots (1)$$

$$F_{d0} = Kx \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2) 式をラプラス変換して, F_{di} と F_{d0} の関係を求めると

$$\frac{F_{d0}(s)}{F_{di}(s)} = \frac{K}{ms^2 + Cs + K} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots (3)$$

但し, $\zeta = \frac{C}{2\sqrt{mK}}$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

(3)式より, K を大きくすれば, F_{d0} は F_{di} にちかずき,非減衰固有角周波数は高くなり応答時間が早くなる. しかし, 減衰係数 ζ が小さくなり, 系が振動的になるので, ζ が適当な範囲におさまるように, m, C, K を選ばねばならない. 微小な切削抵抗の測定の場合には, C はできるかぎり小さくする必要があるので, バイト及び動力計の等価質量 m を小さくできる構造でなければならない. この加工系で旋削する場合, 動力計の過渡応答を求めると次のようになる. 微小範囲においては, 切込み深さと切削抵抗が比例すると考えれば, 1定の切込み深さに達するまでの, 切削抵抗は時間に比例して増加する. 従って, $F_{di} = \lambda_R \cdot t$ とすれば,

$$F_{d0R} = \lambda_R \left(t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \left[1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \sin \left(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \tan^{-1} \frac{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}{2\zeta^2-1} \right) \right] \right) \dots\dots\dots (4)$$

但し, λ_R : 比例定数
 $\zeta < 1$

また, 円周上にキー溝やスプラインのある丸棒を旋削するとき, 切削抵抗はステップ入力として動力計にかかるとから, $F_{di} = \lambda_s$ とすると

$$F_{d0s} = \lambda_s \left\{ 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \sin \left(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right\} \dots\dots\dots (5)$$

但し, λ_s : 比例定数
 $\zeta < 1$

となる.

$K \gg K_c$ で, K_c による復元力が無視でき, 加工物が微小振動をしながら回転している場合. (支持系の剛性が小さいとき).

工作物の振動が, $x_0 = A_0 \cdot \sin\omega t$ とすれば, 動力計の変

位量 x は, $x = x_0 = A_0 \cdot \sin\omega t$ である. また, A_0 を微小な振巾と考えると, 切削力の変動と変位の関係は

$$F_{di} = \alpha (A_0 \sin\omega t) \dots\dots\dots (6)$$

$$F_{d0} = K (A_0 \sin\omega t) \dots\dots\dots (7)$$

但し, α : 定数

となる. 入力に正弦波が入ったのであるから, (3)式において, 周波数伝達関数を求めると,

$$\frac{F_{d0}(j\omega)}{F_{di}(j\omega)} = \frac{1}{\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\} + j2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\begin{aligned} \text{ゲイン: } |G(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{m\omega^2}{K} \right)^2 + \left(\frac{C\omega}{K} \right)^2}} \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{位 相: } \angle G(j\omega) &= -\tan^{-1} \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \\ &= -\tan^{-1} \frac{C\omega}{K - m\omega^2} \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

従って, 周波数応答は(6), (9), (10)式より

$$F_{d0}(t) = \alpha A_0 |G(j\omega)| \sin\left\{ \omega t + \angle G(j\omega) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

また, 共振角周波数 ω_p は

$$\omega_p = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} = \sqrt{\frac{K}{m} \left(1 - \frac{C^2}{2mK} \right)} \dots\dots\dots (12)$$

となり, ζ が小さいほど ω_n に近づく.

また, (9), (10)式より明らかなように, 入力振動の周波数が増えると位相が共に変化するので, 動力計の検出値に補正をほどこさなければならない. しかし, 一定の検出誤差を動力計に認めてやれば, 誤差範囲におさまる周波数域に対しては, 同一条件で動力計が使用できる. 塩崎, 宮下は, 研削動力計について, 検出誤差を ϵ 以下で測定できる振動数範囲を

$$0 \leq \omega \leq \omega_n \cdot \sqrt{\frac{\epsilon}{1 + \epsilon}} \dots\dots\dots (13)$$

$$\epsilon : G(j\omega_{max}) = (1 + \epsilon) G(j0)$$

で与えているが, 研削動力計とちがって, 入力のパワースペクトルでないので, この切削系においては, ζ が小さ過ぎても, 大き過ぎても, 測定範囲はせまくなり, $\zeta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ の近傍で測定範囲が一番大きくなる.

$K > K_c$ で, K_c による復元力が無視できない場合.

K があまり大きくないので, 切削力 F による変位 x によって, 切削場に復元力 $F' = K_c x^2$ が生じ, これが無視できない.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + (K+K_c)x = F_{di}$$

$$F_{d0} = Kx$$

F_{di} と F_{d0} の関係を求めると

$$\frac{F_{d0}(s)}{F_{di}(s)} = \frac{K}{Ms^2 + Cs + (K+K_c)} \\ = \frac{1}{1+K_c/K} \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \dots\dots(13)$$

$$\text{但し, } \zeta = \frac{C}{2\sqrt{m(K_c+K)}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_c+K}{m}}$$

非減衰固有角周波数 ω_n は高くなり、 ζ はより小さくなって、加工系は振動的になる。やわらかい金属や、プラスチックを切削する場合には、あまり問題にならないが、表面の硬いものを旋削するときなどは、切削場の剛性が動力計の剛性と同じくらい大きくなっていく危険性がある。この加工系の動力計にステップ入力がかかったときの応答は、

$$F_{d0s} = \frac{\lambda_s}{1+K_c/K} \left\{ 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \right\} \dots\dots(14)$$

ランプ入力に対する応答は

$$F_{d0R} = \frac{\lambda_R}{1+K_c/K} \left\{ t - \frac{2\zeta}{\omega_n} \left\{ 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t + \tan^{-1} \frac{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}{2\zeta^2-1}\right) \right\} \right\} \dots\dots(15)$$

となる。 $\zeta < 1$ である。

$K > K_c$ で、 K_c による復元力が無視できない、さらに工作物が微小振動をしている場合、等価質量 m_1 の加工物は、 $x_0 = A_0 \sin \omega t$ で振動をする。この振動が、バネ K_c を通して動力計につたわる。

従って、(13)式の周波数応答を求めると、

$$F_{d0}(t) = \frac{\alpha A_0}{1+K_c/K} |G(j\omega)| \sin\{\omega t + \angle G(j\omega)\} \dots\dots(16)$$

$$\text{但し, } |G(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left\{ 1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \right\}^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \\ = \frac{K+K_c}{\sqrt{(K+K_c - m\omega^2)^2 + (C\omega)^2}}$$

$$\angle G(j\omega) = -\tan^{-1} \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

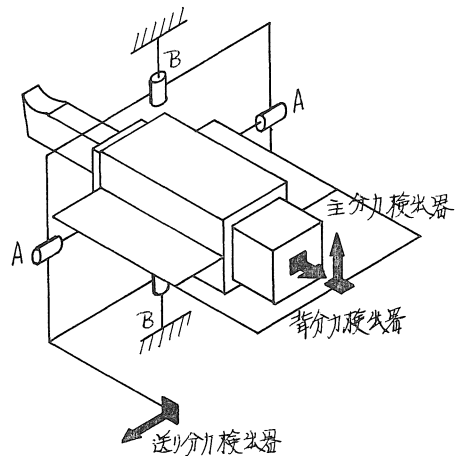
$$= -\tan^{-1} \frac{C\omega}{K+K_c - m\omega^2}$$

となる。

$K \gg K_c$ と $K > K_c$ の場合をくらべると、 $K \gg K_c$ のほうが動力計のゲインが大きい。従って、信号の伝達状態からも $K \gg K_c$ になるように動力計を設計する。さらに、 ζ が適当な値で、共振周波数 ω_p が高くなるように、 m , C , K をきめなければならない。

動力計の基本構造

L・D48型動力計の基本構造を第3図に示す。背分力はバイトの真後ろで、主分力は回転軸A—Aを介して、送り分力は回転軸B—Bを介してそれぞれ検出される。微小切削動力計であるので、 C を極力小さくして、微小な切削力が伝達系路で吸収されないよう工夫してある。 m は、背分力方向分 m_a 、主分力方向分 m_b 、送り分力方向分 m_c と分離して小さくなるよう工夫した。 $m_a < m_b < m_c$ である。L・D48型の設計では、干渉の除去に主眼をおき、検出部は、機械的変位の最大値が5/1000mmまで生ずるように設計をした。従って、検出器のみかけの剛性は $1 \times 10^6 \text{Kg/mm}$, $5 \times 10^6 \text{Kg/mm}$ で、かなり高い。加工物が、ナイロン66, ポリプロピレンなど、熱可塑性プラス



第3図 動力計基本構造

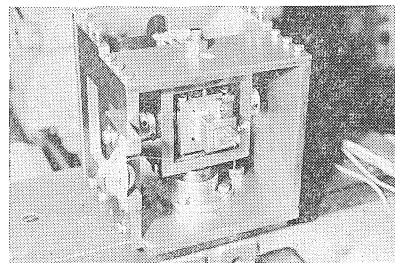
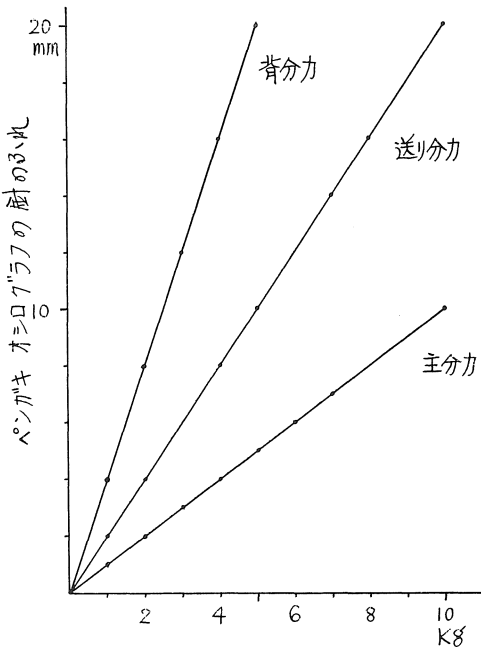


写真1. 試作動力計

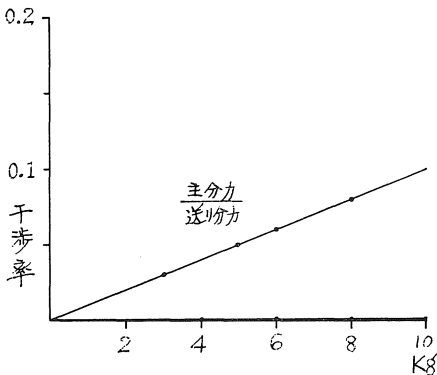
チックなので、切残し率 K もほとんどない。旋削なので、測定周波数範囲は、2000Hz もあれば十分すぎるが、L・D48型では、他の関係から、はるかにそれをうまわれる。すは、 10^{-2} のオーダーである。写真1にL・D48型切削動力計を示す。

実験結果



第4図 静 特 性

第4図に、L・D48型切削動力計の特性曲線をのせる、主分力、送り分力、背分力は、ともに静特性としては十分なものである。検出器の剛性が高いので、荷重の増加時と、減少時のループはほとんど区別がつかない。第5図に干渉率を示す。送り分力から主分力への干渉率は10%あるが、主分力から送り分力への干渉はほとんどな



第5図 干 渉 率

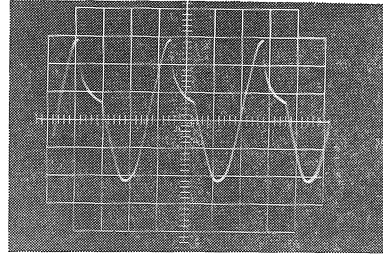


写真2. 振 動 子 入 力

縦軸 : 20/cm
横軸 : 5msec/cm

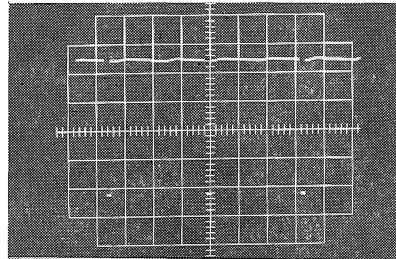


写真3. 60Hzのパルス波に対する
主分力検出器の過渡応答
横軸 : 5msec/cm

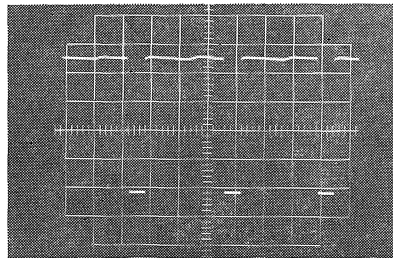


写真4. 60Hz のパルス波に対する
送り分力検出器の過渡応答
横軸 : 5msec/cm

い。その他の分力間の干渉もほとんどない。従って、干渉をなくす構造としては、L・D48型の基本構造でよい。次に、写真2のような入力で、振動子を振動させ、バイトの切削にあずかる部分へ、パルス的な入力を60Hz で入れた。その応答を、写真3~5に示す。応答波形は、立ちあがりも十分であるし、減衰も速い。第6図、第7図に動力計の検出状態を示す。両図とも、ポリプロピレンを切削したものである。切込み量0.5mmでは振動を生じている。バイトがポリプロピレンの円周上ですべっていることが、主分力のグラフよりわかる。プラスチックの場合は、加工物の支持系も、金属の場合とちがった配慮が必要であり、刃物の切れ味なども問題になる。

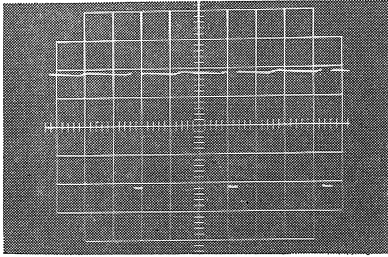
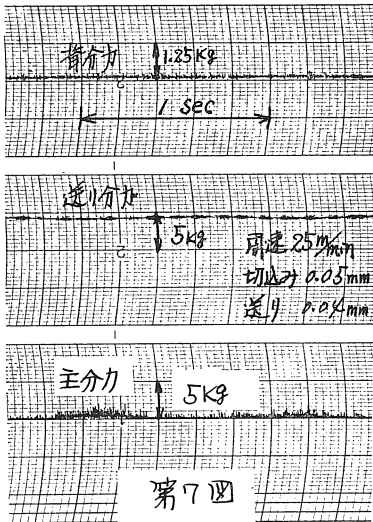
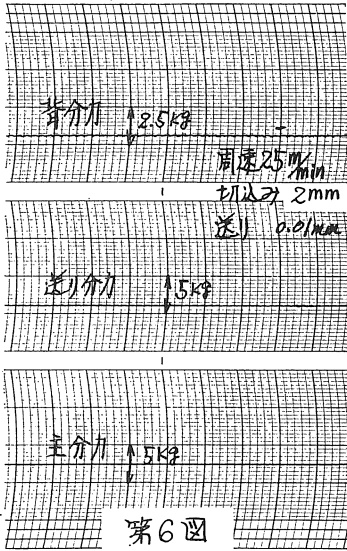


写真5. 60Hzのパルス波に対する
背分力検出器の過渡応答
横軸 : 5msec/cm



結 言

1. 干渉力除去の問題は L・D48型の構造で解決できる。
2. C の値を非常に小さくしてあるが、L・D48型における振動の減衰は速い。
3. 動力計を設計する場合は、動力計の剛性を、切削剛性に対してできるかぎり大きくとる。等価質量mは、できるかぎり少ないほうがよいが、強度上限度がある。Cは、微小入力の場合には、おもいきって小さくしてよいが、系が振動的になるときは、大きめにする。

参考文献

1. 塩崎進, 宮崎政和
研削動力計の動力学的解析
動力計の動力学と設計 (第1報)
精密機械 35 6 (1961)
2. 竹山秀彦, 坂田興亜
切削剛性
切削における動特性の解析 (第1報)
精密機械 35 6 (1961)
3. 塩崎進, 宮下政和
研削動力計の試作
動力計の動力学と設計 (第2報)
精密機械 35 7 (1961)