

切削動力計の試作とその性能について

是 枝 賢 一*

(受理 昭和31年5月31日)

ON THE PERFORMANCES AND TRIAL MAKING OF DYNAMIC CUTTING FORCE TRANSDUCER

Kenichi KOREEDA

This report includes the studies with the purpose of making transducer type of the dynamic elemental structure when the intermittent cutting phenomena are measured with the oscillograph through the strain meter from cutting force transducer.

As the result of experiments, some performances are raised as follows :

- 1) Transducer is desired a simple unit body to keep the stress balance and stability.
- 2) It takes an accurate measurement and resolution of three-dimensional cutting force to be shaped eight square type without a circle.
- 3) It is deeply affected by frequency characteristic, sensibility and damping factor to be profiled accurately intermitted cutting phenomena of 50 Hz.

So a new quick response transducer was made in a natural frequency of 400Hz to get smaller dynamic error as the result of practical test.

1. 緒 言

現在まで一般に用いられてきた切削動力計には、種々あるがいずれも連続切削に適したもので応動周波数が低く鋼材のような比較的力量の大きな測定範囲を対象としたものが多い。これらの動力計では木材や竹材の鉋刃加工などのように断続的な三次元切削現象を示し、しかも切削速度が鋼材と比較して数倍はやい場合には主分力、背分力、横分力の三分力同時測定による忠実な現象波形の解析はとうてい期待できない。またこのような切削力の変動の非常にはげしい現象波形を記録した例もみあたらないようである。

本報は抵抗線ひずみゲージを利用して高速度の断続切削時における三分力の同時測定を目的として N. H. Cook 式力量計を中心に種々の動力計を試作し、その機能や記録された現象波形から動力計の精度や性能などについて検討を加えるとともに、動的測定範囲の限界を究明したい。

2. 試作器の構造と動作

断続的な切削力を測定するとき、まず問題になるのが検出部の動特性であり、抵抗線ひずみゲージ式では

ひずみ発生部の応動周波数上限が高く、加うるに計測系の構成要素が現象より十分広い帯域巾をもつことが必要である。また動力計の構造が安定しており検出部は急激な切削力の変動に追従してゆく弾性変換器であるべきで、できるだけ小型軽量にして弾性率の高いものを用いなければならない。試作器はさらに三次元切削における三分力同時測定を目標にしているから三分力の分離が完全で相互に干渉のないことが必要であり、また三分力の感度はできるだけ一様であることが望ましい条件となる。しかし感度は計測系の増巾器や減衰器で適当に調整できる範囲にあれば実用上さしつかえない。要するに切削速度が高速でしかも断続的切削のようなかこくな条件下で使用される動力計は、周波数特性や直線性を吟味し、応動周波数と力量との限界を明らかにしておくことが重要で上述の条件を念頭に入れて種々考察し、試作した動力計について今から検討してみる。

ひずみゲージ貼付部が最も単純な片持ばり型は、ゲージの組合わせをよほどうまくしないと三分力の分離が無理なことをすでに経験している。図1は一般の力量計によく用いられている薄肉の弾性環三個を三角形の頂点位置に取りつけたものを二組、図のように向きを逆にして重ねた動力計の写真である。環の直径は、

* 鹿児島大学工学部機械工学第二教室・助手

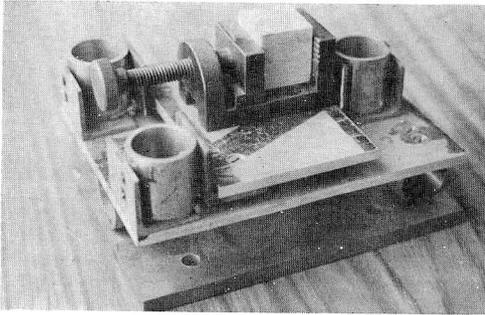


図 1

ゲージ貼付可能な最小限まで小さくして固有振動数をあげることに努めた。環一個の固有振動数は、半径 1.2cm, 肉厚 0.2 cm, 巾 2.5 cm として理論計算すると 7.7kHz となる。環に取りつけられたジュラルミン板は、剛性を保ち重量軽減をはかつたものでその中央に試料が取り付けられる。板と環は研磨された直角板とねじで取り付けられるが、その寸法、精度が悪いと組立てが円滑にゆかず環を不必要な方向にひずませて環に貼られたゲージ出力を不安定にする。また三分力の分離性も落ちてくる。組立て後、動力計の固有振動数は種々の重量が影響して 250 Hz にとどまつた。

従来の連続切削や低速時の動的力量測定には、この種のもので固有振動数が 250 Hz 位であれば充分実用されるが、試作の主な目的である高速時の鉋刃加工用動力計としては固有振動数が低過ぎて測定できない。

図 2 は比較的高い固有振動数をもつ周辺固定の円板を 2 個ずつ 2 組組合せてゲージを各円板上に貼つて三分力分離をはかり、前述のものよりも固有振動数があることを期待したものである。半径 1.8 cm, 厚み 0.15 cm の円板の場合、理論計算で固有振動数は 21 kHz になるが、図のごとく組立てると付加質量の影響で予想以上に低くなり 400 Hz 前後となつた。測定される切削力が小さいほど厚みはうすく、径は小さくする必要があり、したがつて製作がむずかしくなる。また 2 個の円板を組合わすときに、たわんだ状態で接続されると、円形環の場合以上に三分力の分離性が悪くなり相互干渉が 20% にもおよび、出力の平衡と零点調整が容易でなく不安定となる。したがつて円板の固定には非常に精密さが要求されることにある。

試作した 2 台を通して痛感することは、動力計はなるべく複雑な機構をさけ、ねじ、ばね等の接続部はできるだけ少なく摩擦部分のなるべく少ない単体で、しかも簡単な機構をもつことが必要条件であることがわ

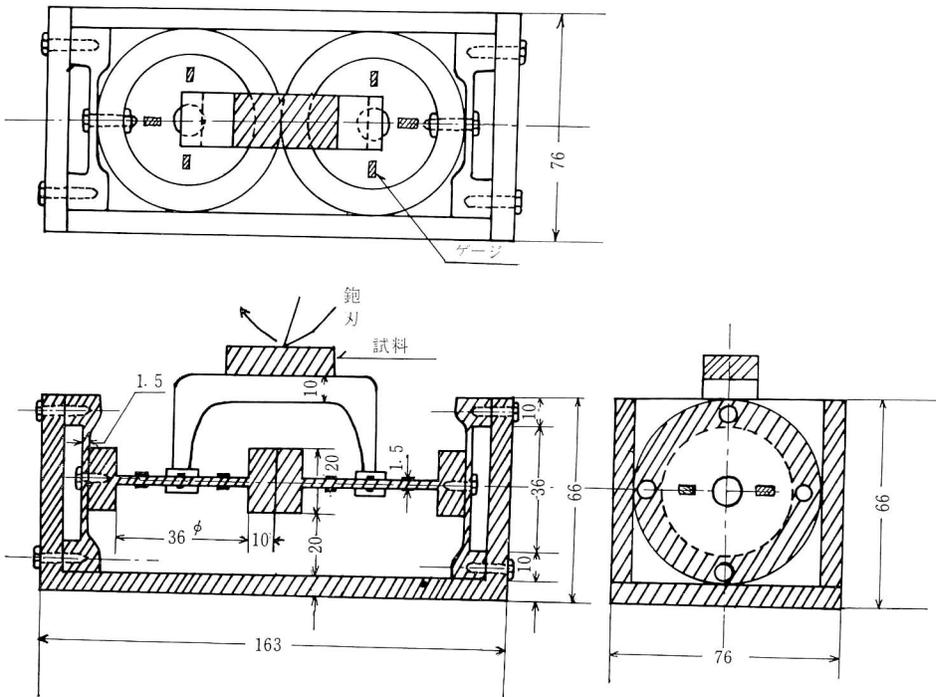


図 2

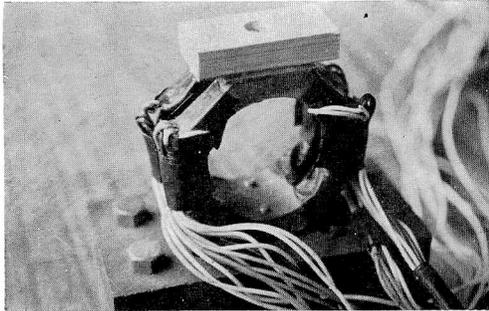


図 6

振動数は、一般に電磁オシログラフの感光度や光量の増大をはからないと、現在では、1000 Hz 位の急峻な波形記録が光点速度の上昇によつて不鮮明となりがちで、動力計の固有振動数もそれに近い周波数までが、理論的に他の条件等も考えあはせれば上限だろうと推察される。

3. 実験結果と考察

いろいろ試作した動力計のなかで切削現象を最も忠実に再現記録したと推察されるのは、正八角形の弾性体を利用した図3. 図5の型で切削速度 10.9 m/s (2800 rpm) までの範囲ではほぼ満足すべき実験結果を得た。以下比較的解析の容易なこれらの動力計を中心にその精度や性能を吟味してゆきたい。

記録された波形を解析するにあつて、まず高速連続切削の代表とも言うべく鉋刃切削加工例をとりあげることとする。鉋刃切削では切削断面積が刃先の回転角度に応じて刻々変化する。また切刃のねじれ角によつても切削断面積の変化状態が相異してくる。この切削断面積の変化が切削力と重要な関係をもっていることは明らかである。したがつてその変化曲線を定量的にえがいてみる必要が生じた。一般にねじれ角は 30° 位までが実際に使用される限度なので、それまでのねじれ角について切削断面積を求めればよい。上向き削りの場合について、切刃の切削方向に直角な切削断面積を幾何学的に近似計算して具体的に数値をあてはめてみた。理論式に使われる記号は次のように定めた。

- A: 切削断面積 (mm²), s: 送り (mm),
- s_z: 1 刃当りの送り (mm/min), z: 刃数.
- r: 鉋刃半径 (mm), w: 切削巾 (mm).
- h: 切削厚さ (mm), t: 切込深さ (mm).
- v: 切削速度 (mm/min), θ: ねじれ角 (度).
- n: 鉋軸回転数 (rpm).

φ: 鉋刃回転角 (ラジアン).

φ₀: 一刃の一端が削り始めてから他端が削り始めるまでの刃の回転角 (ラジアン).

φ_t: 一刃の一端が削り始めてから最大切削厚さのときまでの刃の回転角 (ラジアン).

φ_m: 一刃の一端が削り始めてからその刃先が試料面からはなれるときまでの刃の回転角 (ラジアン).

図7は刃先がえがく運動軌跡を示したもので、となり合う二つの刃のえがく二本のトロコイド曲線にはさまれる部分が切屑として削り取られる。ねじれ刃の場合は、この切屑が三次元的に変化してゆく。鉋刃加工では一般に $v \gg s$ の切削条件で切削されるから刃先の運動軌跡は円運動とみなしてさしつかえなく近似的に次式で与えられる。

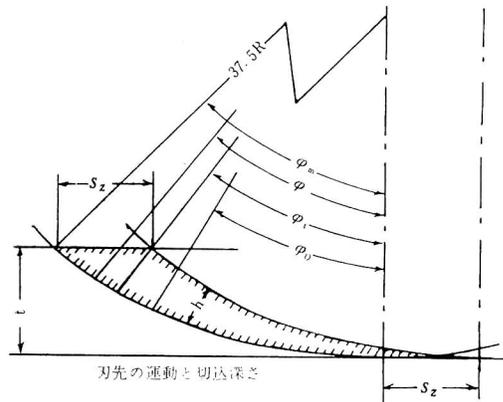


図 7

$$h = \frac{ss_2 \sin \varphi}{1 + \frac{s}{v} \cos \varphi} \quad \dots [E. Sachsenberg \text{ の式}]$$

$$\doteq s_2 \sin \varphi$$

したがつて直刃 (ねじれ角 $\theta = 0^\circ$) の切削断面積は

$$A_f = h \cdot w = s_2 \sin \varphi \cdot w$$

ねじれ角 θ° では、切削断面積の変化を刃先回転角の位置によつて便宜上 5 段階にわけて近似計算してみた。

$$A_1 = \frac{h \cdot r \cdot \varphi \cdot \cot \theta}{2} = \frac{s_2 r \cdot \cot \theta}{2} \varphi \cdot \sin \varphi \dots 0 < \varphi < \varphi_0 \quad \dots (1)$$

$$A_2 = \frac{s_z \cdot r \cdot \cot \theta}{2} \{ \varphi \sin \varphi - (\varphi - \varphi_0) \sin(\varphi - \varphi_0) \} \dots \varphi_0 < \varphi < \varphi_t \quad \dots (2)$$

$$A_3 = \frac{s_z \cdot r \cdot \cot \theta}{2} \left[\left\{ \frac{r \sin \varphi (\cos \varphi - \cos \varphi_m)}{s_z \sin \varphi \cos \varphi} + \sin \varphi_t \right\} (\varphi - \varphi_t) + \varphi_t \sin \varphi_t - (\varphi - \varphi_0) \sin(\varphi - \varphi_0) \right] \dots \varphi_t < \varphi < \varphi_m \quad \dots (3)$$

$$A_4 = \frac{s_z \cdot r \cdot \cot \theta}{2} \{ \varphi_m \sin \varphi_t - (\varphi - \varphi_0) \sin(\varphi - \varphi_0) \} \dots \varphi_m < \varphi < \varphi_0 + \varphi_t \quad \dots (4)$$

$$A_5 = \frac{s_z \cdot r \cdot \cot \theta}{2} (\varphi_0 + \varphi_m - \varphi) \sin(\varphi - \varphi_0) \frac{\cos(\varphi - \varphi_0) - \cos(\varphi - \varphi_m)}{s_z \sin(\varphi - \varphi_0) \cos(\varphi - \varphi_0)} \dots \varphi_0 + \varphi_t < \varphi < \varphi_0 + \varphi_m \quad \dots (5)$$

刃の回転角ごとに上式から変化曲線を求めると図8のようになる。直刃の場合で最大切削断面積を刃先が通過後削り終るまでその変化は最も急峻な波形をえがく。このような現象を仮に先鋭な三角波形にみなして

も計測系の応動周波数は、その3倍以上のものでなければ追隨してゆかないことが想像される。一方記録に使う電磁オツシログラフの振動子は高い固有振動数をもつものほど感度が落ちて記録そのものが困難になる。そこで動力計のひずみを大きくするか、計測系の増巾度をあげてやらねばならなくなる。計測系の増巾度をあまりあげると精度や直線性、安定性などで問題が生ずる。動力計検出部のひずみそのものを大きくとるほど試料の変位量は増大してそれだけ減衰振動の時間も長くなり、試料の切削現象そのものに影響をおよぼすことは言うまでもない。これはゲージを使用する変換器には共通的なことで、感度とひずみに起因する精度との両者の適正な平衡が必要となる。表1は工具の刃型諸元で、図9、図10はねじれ角10°、30°の一枚刃で竹材を鉋刃切削したときの記録波形の例である。図によれば波形は、図8にえがいたような特長の

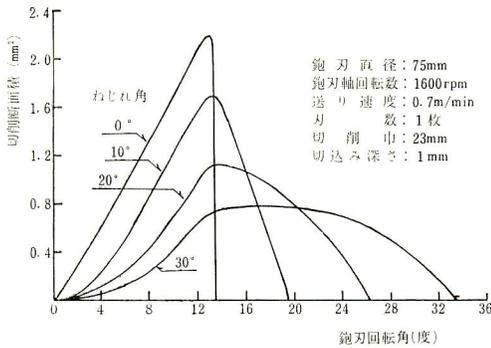
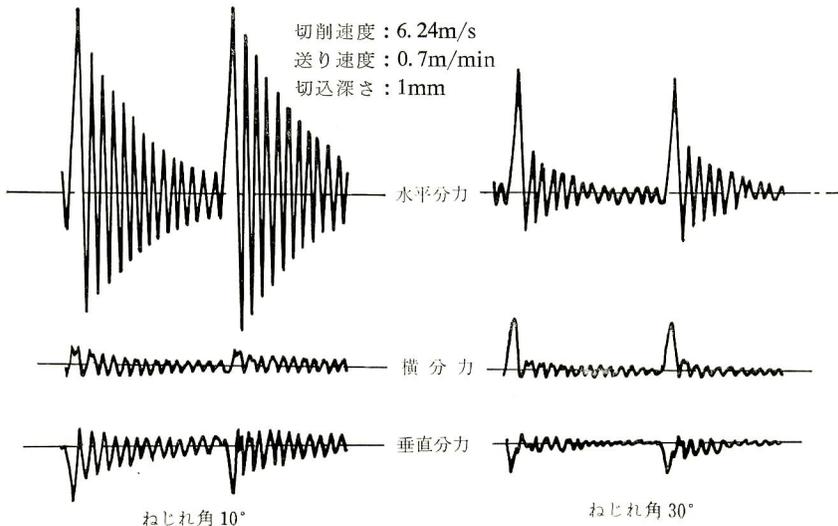


図 8



ねじれ角 10°

ねじれ角 30°

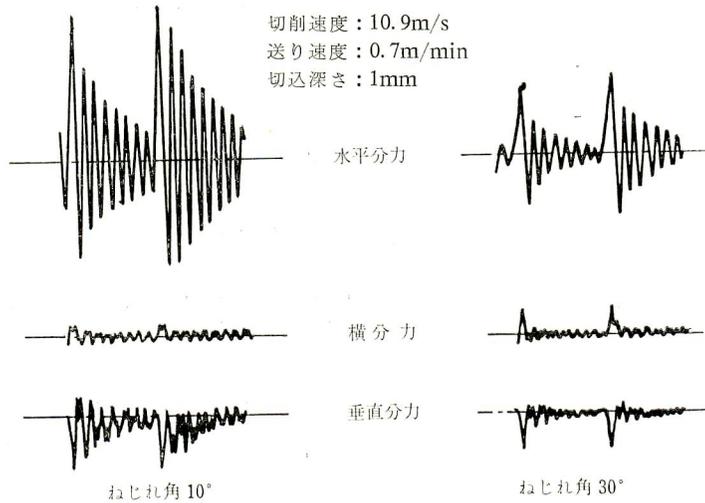


図 10

表1 刃型構成要素

材質	直径 (mm)	ねじれ角 (度)	すくい角 (度)	逃げ角 (度)	ランド (mm)
SKH2	75	0	20	9	2.0
		10	21	10	2.5
		20	21	10	2.5
		30	19	11	4.0

ある波形にはならず、三角波形とみなしてさしつかえなくねじれ刃の変動現象は周期的な瞬時値のみがあら

われているに過ぎないことがわかった。

切削力が計算された切削断面積の変化と全く同じ傾向をたどると思わないが、これは動力計だけに問題があるのではなく異方性をもつた竹材の物理的性質も影響しているものと思われる。比較的切削速度の低速な1m/s以下の切削範囲では、かなり類似した波形が記録されている。

次に振巾の正確度を検討するために、ねじれ角によつて切削断面積の最大値がどう変るかをえがき、測定

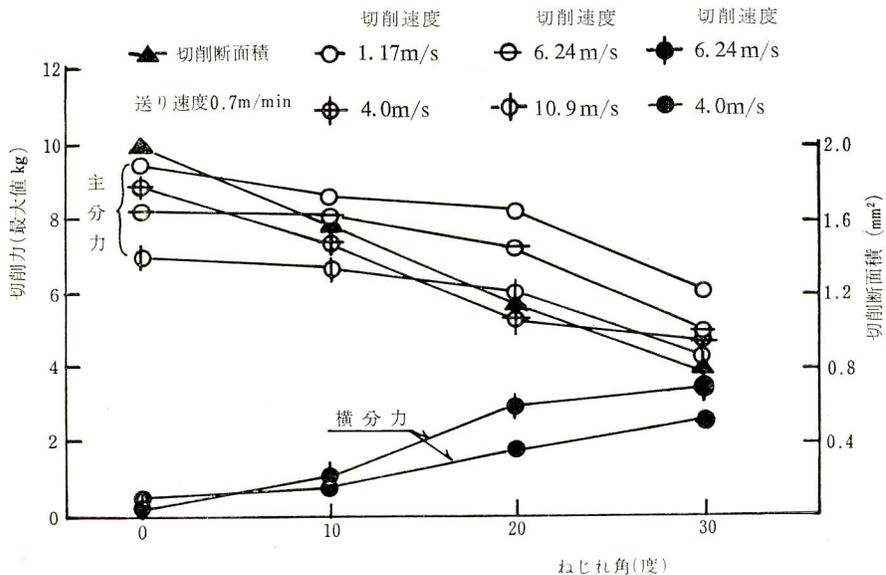


図 11

した切削力(主分力)の最大値と比較したのが図11である。両者の曲線から算出される比切削力は、切削条件が低速な場合の鉋刃加工例²⁾とほぼ同じ値を示している。すなわち切削速度がはやくなるほど概して切削力は減少し、比切削力は 5 kg/mm^2 前後の値を示し

ている。ねじれ角 0° で切削力がわりあい低いのは、切削面積の変化が最も急峻であるため動力計の追従がおくれた結果ではないかと推察される。鋸断加工による竹材の比切削力³⁾は工具により異なるが、それでも切削断面積が大きくなると 5 kg/mm^2 前後の固有値

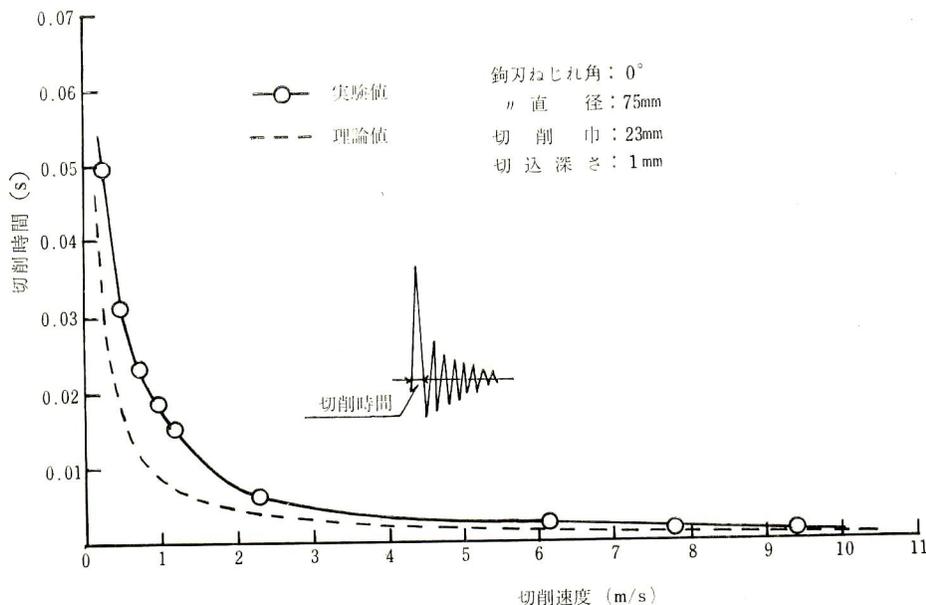


図 12

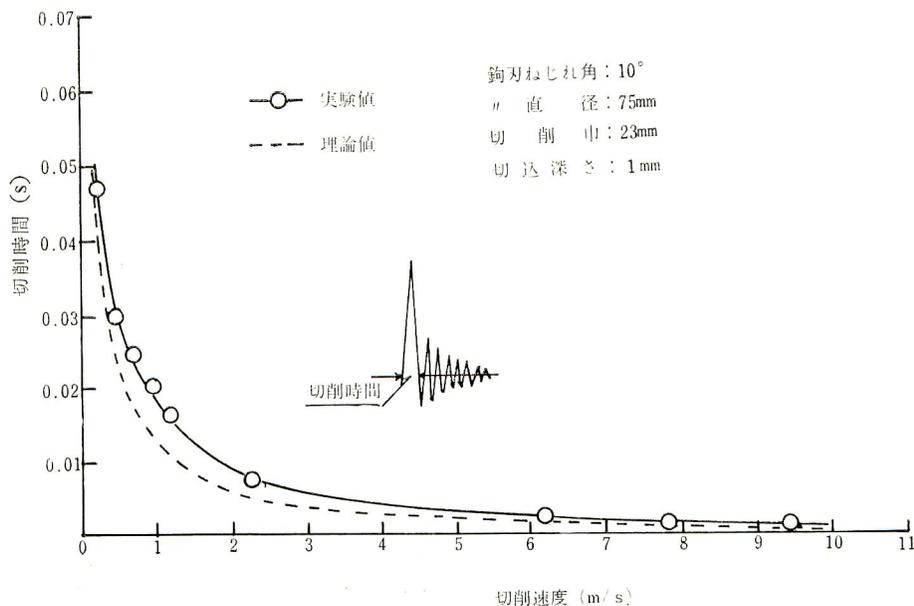


図 13

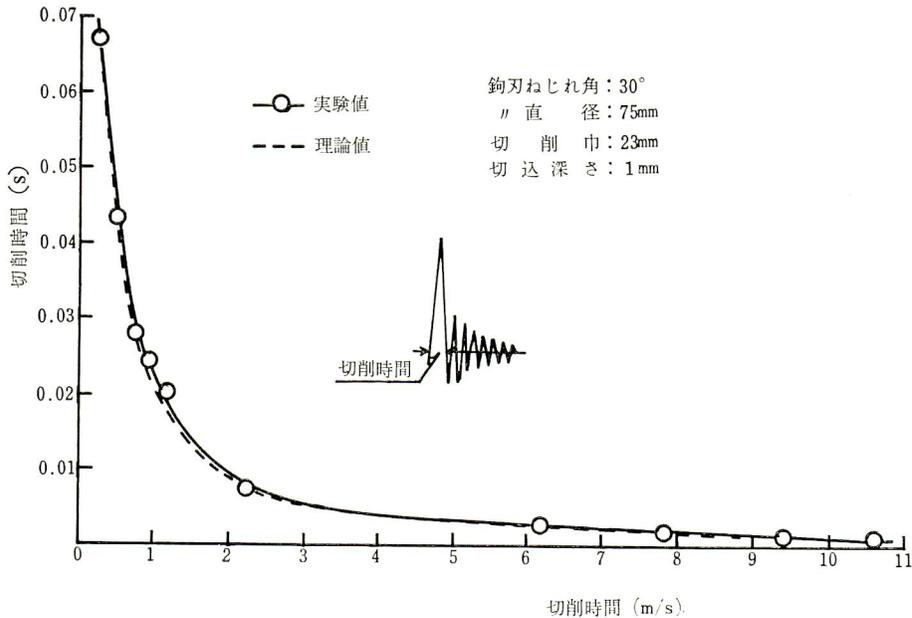


図 14

に近づいていることから推察すれば、振巾値の測定誤差は比較的少ないものと思われる。

次に動力計の動特性を検討する一手段として記録波形から切削現象間の時差を読んできた。図12、図13、図14に記録波形から求めた一刃当りの切削時間と、その理論値とを示した。図によれば、切削速度に対する切削時間の傾向は理論値とほぼ同じ傾向をたどるが、実験値と理論値との差はねじれ角が小さいほど開いてくるようである。これは、ねじれ角が小さいほど立上りの急峻な条件が要求され、特に直刃では最大切削断面通過後、刃先が試料をはなれるまでの時間が非常に短かいので動力計がそれにしたがわず、このことが測定値が理論値よりも大きくなっている主な原因だと思われる。ねじれ角 30° になると切削力の変化が相当おそくなるのでほとんど理論値と一致してくる。

動力計のほかに記録計の振動子が時差に影響することも考えられるので、低周波発振器を使用して振動子の周波数特性をしらべた結果が図15である。実験に使用した振動子は、1800 Hzの周有振動数をもつものでその周波数特性は良好である。しかし(III)の振動子は100 Hz付近ですでに40%ほど感度が落ち、これを知らずに使用すると動的測定の著しい誤差の要因となることをつきとめた。

動力計の性能を評価する大事な要素として感度があげられる。動力計の感度をしらべるのに最も望ましい

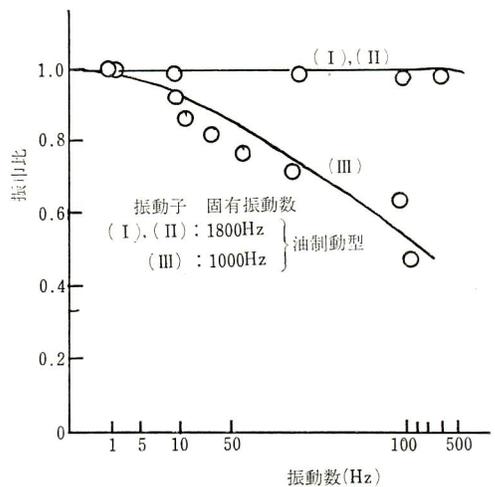


図 15

のは動的検定であるが、実際に既知の衝撃的入力にあたえることは困難なので静荷重による検定に頼らざるをえない。図16は、静荷重を加えたときの動力計の較正曲線を示したものである。各方向にそれぞれ荷重を加えたとき、他方向におよぼす影響は5%にも満たない程度で三分力の分離と相互干渉の少ないことでは満足すべき結果を示した。また較正値は、計測系の増巾度や記録が三分力とも同一条件であるから動力計自体の三方向に対する感度の大小を比較することができ

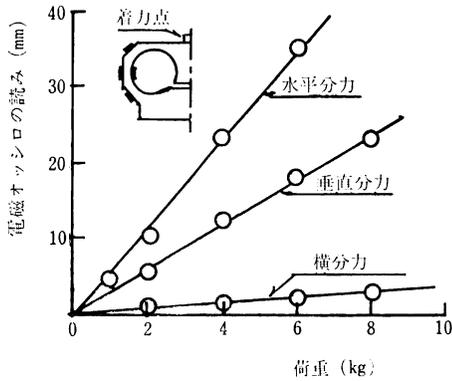


図 16

る。水平分力、垂直分力の二分力から算出される主分力は、この程度の感度で充分なようであるが横分力はねじれ角の影響を詳細に検討する場合には計測系の増巾度か、記録計の振動子の高感度のものを使用する必要がある。横方向感度をあげるべく、動力計の形状を改めることは、横方向の変位量がそれだけふえるので切削現象そのものに好ましくない影響をあたえるものと推察される。したがって水平方向、垂直方向に対しても同じことが言えるので、荷重によつて動力計の着力点における変位量を電気測微計で測定してみた結

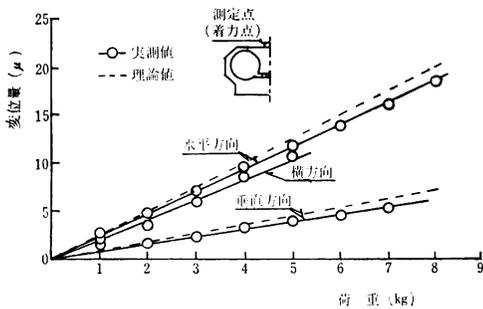


図 17

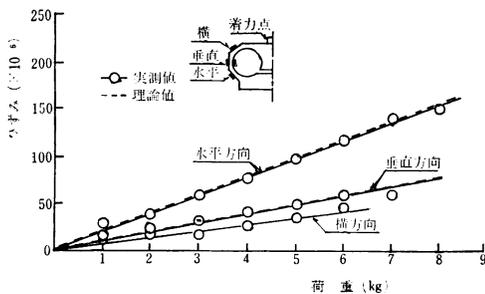


図 18

果が図 17 である。実測値と比較するために動力計左右の正八角形三辺を細い曲りはりと近似的に仮定し、中央上辺部はたわまない剛体として理論計算した理論値を示してある。ひずみ量についても同様な考えかたで近似計算すれば図 18 に示すような値となり、変位量の場合と同様に実験値と理論値との差はいずれの分力においても 10% 以内にははいつているようである。上述の計算で求めた水平変位量からばね常数を求め動力計の固有振動数を算出してみると、330 Hz となり実測値 340 Hz に近い値となった。理論計算に用いた数値は下記の通りである。

弾性係数： $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

断面の中：4 cm

断面の厚み：0.65 cm (平均値)

曲りはの曲率半径：2.78 cm

振動部重量：剛体部重量 390 g, 曲りはり部 265 g,

万力 200 g

断続的な切削現象における測定に大きな支障となるものに動力計の減衰振動がある。切刃一枚が切削し終り試料をはなれてから次の刃が試料にあたるまでに動力計のひずみ部振動はほとんど静止状態であることが望ましい。前刃による振動が残ると次刃が試料にあたるとき初速度があたえられるから切削力の振巾値が異なってくる。また試料、工具などの各部取り付けかたが悪いと不純な高調波を含み動力計の固有振動数に近づくので波形はみだれてくる。記録される切削後の減衰振動状態は、動力計自体の減衰率と記録計振動子の制動度にほとんど左右されるものと考えられるが、振動子は制動度 0.7 で直線的な振巾比を示すのでそれによる影響はさほど問題にはならないものと推察される。電磁オツシログラフに記録された波形から減衰率を求めてみると、0.024 となつた。動力計の固有振動数を充分あげることができれば、適当な制動抵抗をつけ加えることによつてさらに性能が改善されるものと思われる。

4. 結 論

試作された動力計の固有振動数は、最高 400 Hz で鉋刃加工における切削速度が 11 m/s までの変動した切削力の測定とその記録ができたが、目標としているより以上の高速な切削現象の波形解析までにはいたらなかつた。断続的な三次元切削時における三分力測定と波形解析に、抵抗線ひずみ計の力量変換器として動力計を使用するとき、その機構と性能に留意すべ

き点を試作した動力計を通じてあげれば下記の通り要約される。

1) 動力計本体は、できるだけ単体が望ましい。理由はひずみ計の零位平衡と安定度がよく、くり返し波形記録において波形のずれが少なく速応性にすぐれている。

2) 三分力の分離性は対象的な機構をもとにしたものが一般に良く、試作されたもののなかでは内面丸穴、外面八角形型のものが最も良好で相互干渉は5%以内におさえられた。しかし、これらの形状や寸法精度が悪いと三分力の分離が悪くなり、相互干渉の致命的な欠陥となる。

3) 材質の面では、鋳鉄製の動力計が比較的精度や動特性にすぐれている。

4) 力量の測定範囲は、ひずみ計に必要な感度と応動周波数の上限とに密接な相互関係をもつので、三者の適当な釣合いが最も留意すべき問題点となる。

5) 動力計の自重や試料取り付け金具などの付加質量の軽減には限度があり、またひずみゲージ貼付面積も必要最小限界があるため、固有振動数 400 Hz 以上のものの動力計製作にはかなりの困難が予想される。

6) 試作した動力計の最高固有振動数は 400 Hz で、断続切削回数 50 Hz、切削速度 11 m/s が測定範囲のほぼ上限とみなされる。

動力計の検討に、竹材の鉋刃加工による実験例を中心に取りあげたのでやや一般性に欠けたところもあるものと思われるが、試作した動力計より、さらに動特性のすぐれた三次元切削動力計を目標に研究してゆくつもりであり、少なくとも断続回数 100 Hz の現象波形解析まで忠実におこなえるものを求めたい。

おわりに本研究にあたって御指導いただいた中島助教授に厚く御礼を申し上げますとともに、動力計や実験装置の製作に終始協力された福永補手に心から謝意を表します。

文 献

- 1) 益子正己他：フライス削りとフライスの設計，ラジオ技術社，39. 11. 25, 9.
- 2) 中島・是枝：竹材の鉋刃加工について，精機学会講演前刷，42. 4, 45.
- 3) 中島・是枝：竹材の鋸断加工について（第3報），精機学会講演前刷，43. 4, 223.