

金属の旋削におけるトルクの変動*

棟 徹 夫

(昭和42年10月31日受理)

The Variation of Torque in Cutting Metal

by Tetuo TO

Experiments of measuring torque in cutting metals by a lathe were carried out with a torque meter and cutting dynamometer which were applied with resistance wire strain gages.

Several results were obtained concerning with torque variation and cutting force through this study.

They were as follows: —

1) The variation of torque was similar to that of the principal component of cutting force and by analyzing the torque variation the tendency of the cutting force could easily be imagined.

2) The variation of torque caused by changing the work material, shape of cutting tool and the quality of tool was also similar to the cutting force under the same cutting conditions.

3) The tangential force calculated from the torque value was nearly the same as the cutting force in several percent of error.

4) The ratio of maximum torque value to mean torque value increased according as the depth of cut decreased, and its value decreased according as the cutting speed increased.

5) The difference between maximum torque value and minimum one, which was computed in terms of torsional strain, increased according as the depth of cut increased within the area of low cutting speed.

1. 緒 言

一般に工作機械、加工機械など、モーターで駆動され主軸を回転して仕事をする機械では、その所要動力を算定する方法の一つとして、トルクメーターを用いて回転トルクを測定し、それにもとづいて所定の計算式から動力を求める方法がある。

この場合、トルクは、負荷と回転主軸との間に連結されたトルクメーターの軸に生ずるねじりによるせん断歪をもとにして算定されるが、歪測定の方式には抵抗線歪計式、磁歪式など種々の型式のものがある。

* 精機学会北海道支部北見地方大会講演会発表 (昭42. 9. 1). 図1 18 m/min, 29 m/min, 46 m/min.

このようにトルク測定の実験原理を回転軸にかかるねじりモーメントに置いているので、これを利用して、所要動力の測定のほか、回転機構を持ち回転運動によって仕事をこなす機器類、たとえばリーマ、ドリルなどの回転工具による切削力の測定や、バフ、グラインダーなどの駆動抵抗、あるいは攪拌装置を用いた粘度抵抗の測定などが行なわれている。

旋盤を用いて行なう金属の旋削の場合、その切削力の測定には、通常いわゆる三分力切削動力計が用いられ、工具におよぼす切削抵抗を主分力、送り分力および背分力に分けて測定するが、旋削の場合は被削材が回転することから、相対的に前述の回転工具と同一視することができるので、切削の際に工具先端に働く接線力(すなわち切削主分力)によって生ずるトルクを知ることによって、逆に切削主分力の変動状態を知ることが可能となる。

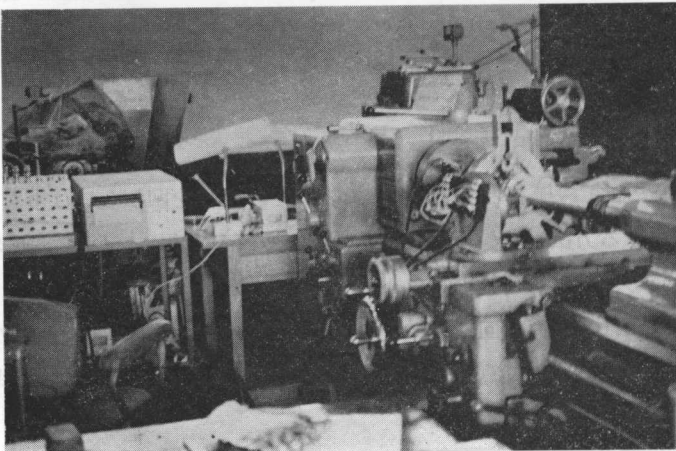
このようにトルクの測定によって、その際の切削力(主分力)を算定できるとともに、トルクメーターにつらなる旋盤主軸におよぼすねじりモーメントの状態もあわせ知ることができ、旋盤主軸の構造、強度などについての資料を提供することにもなる。

以上のような見地から、本実験においてはトルクメーターを用いるとともに、切削動力計を併用して、金属を旋削した際のトルクの変動状況、軸に生ずるねじり歪の動向を観察するとともに接線力と切削主分力との比較など、金属旋削におけるトルクについて一連の実験を行ない、その結果をここに報告する。

2. 実 験

2.1 使用機械および実験装置

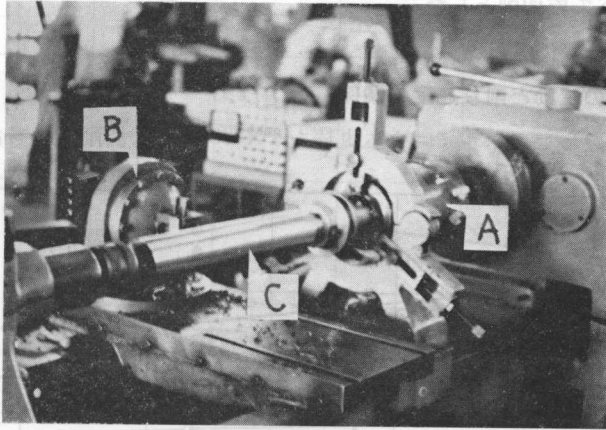
工作機械は、ワシノ製 LE-19 F 型高速精密旋盤を使用し、測定器としては、共和電業製 TP-2 A 型抵抗線式トルクメーター、同じく共和電業製 DPM-6 CT 型抵抗線動歪測定器および自家製の円盤たわみ型抵抗線式切削動力計^{1),2)}を用いた。また、波形の記録には共和電業製



第1図 実験装置の外観

RMV-33 型電磁オシログラフ (ラピコーダ, M-1K-22 B 型ガルバ装着) を使用した。

実験装置の外観を第 1 図に, 切削状況を示す近接写真を第 2 図に示す。トルクメーターは, 旋盤主軸台とセンターを支持するためのふれ止めの間に固定し, 切削動力計を刃物台の位置にセットした。トルクメーターからの歪波形と切削動力計からの切削力波形は, 同時にラピコーダを通じて同一記録紙上に記録された。



第 2 図 切 削 状 況

(A) トルクメーター, (B) 切削動力計, (C) 被削材

2.2 被削材および実験条件

使用被削材は, 直径 58 mm の機械構造用軟鋼 S20C の丸棒およびアルミ丸棒を長さ 330 mm に切断して用いた。S20C 丸棒は, 調質のため加熱温度 880°C で 50 分間加熱し, 赤色が消滅するまで炉中で徐冷した後, 薬灰中に埋没し空中徐冷によって焼ならしを行なった。

第 1 表に S20C の化学成分ならびに硬度を示す。

第 1 表

化学成分	C	Si	Mn	P	S	ブリネル硬度
S20C	0.18	0.28	0.48	0.026	0.020	137

使用工具は, 東芝タンガロイ PX-20, JIS 33-4 型 (0, 6, 6, 6, 8, 0, 0.5) および JIS 31-2 型 (0, 6, 6, 6, 15, 15, 0.5) と SKH 4 の完成バイトを上掲の諸元と同一に研磨したものを併用した。

工具研削には, 牧野製 O-40 型工具研削盤にダイヤモンドホイールを取りつけて行ない, 研削後ハンドラップでノーズ半径を手とぎした。

切削条件は次のふた通りに従ったが, 無段変速機を使用しなかったため, 回転数は使用旋盤の速度段数を全域にわたって用いた。

- (1) 送り 0.32 mm/rev 一定で, 削り速度は 11 m/min, 18 m/min, 29 m/min, 46 m/min,

70 m/min, 116 m/min, 181 m/min および 285 m/min の 8 段階を用い, 切込深さは 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, 1.00 mm および 1.50 mm の 5 種類とした。

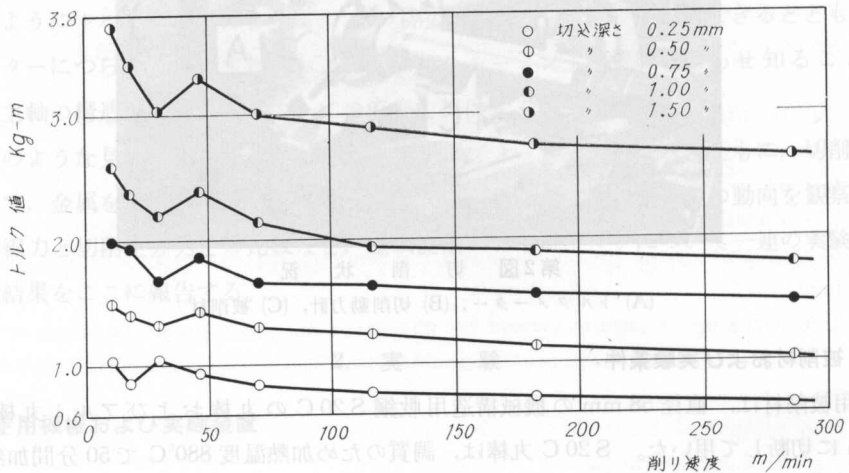
(2) 切込深さ 1.00 mm 一定で, 送りは 0.05 mm/rev, 0.10 mm/rev, 0.20 mm/rev, 0.39 mm/rev, 0.57 mm/rev および 0.81 mm/rev の 6 段階とし, 削り速度は 18 m/min, 29 m/min, 46 m/min, 116 m/min および 285 m/min の 5 種類をとった。

なお切削はすべて乾切削とした。

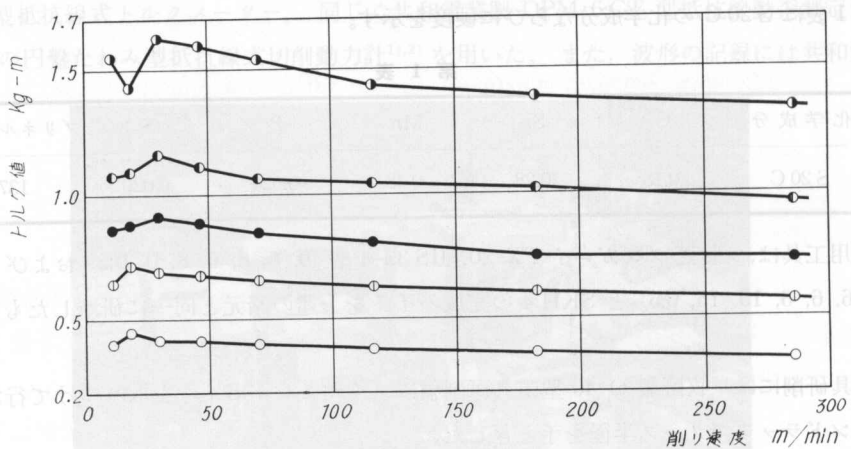
2.3 実験結果ならびに考察

2.3.1 トルクの変動と削り速度の関係

上述の S 20 C ならびにアルミニウム丸棒を PX-20 工具で切削した場合のトルクの変動状



(d)

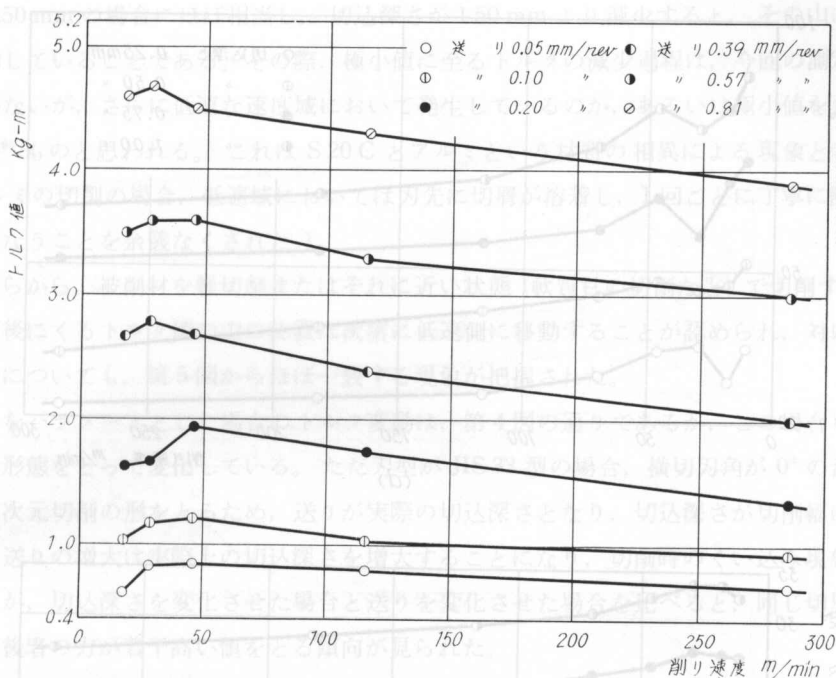


(b)

第3図 トルクの変動と削り速度の関係 (I)

工具: PX-20 (33型) 被削材: (a) C 20 S, (b) アルミニウム

送り 0.32 mm/rev 一定



第4図 トルクの変動と削り速度の関係 (II)

工具: PX-20 (33型) 被削材: S20C

切込深さ1.0 mm 一定

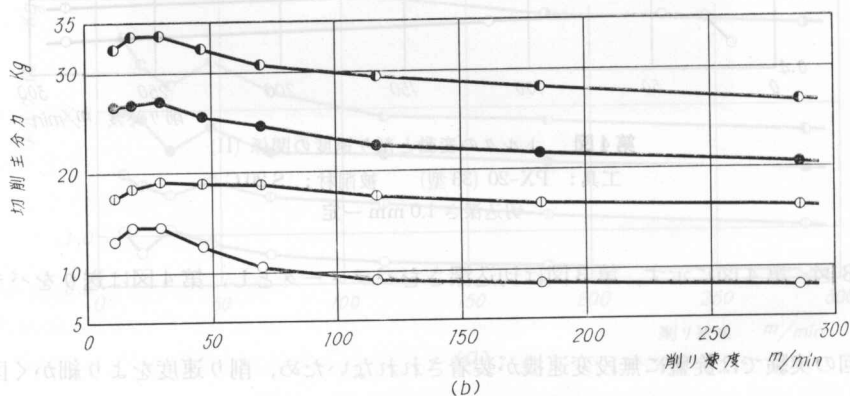
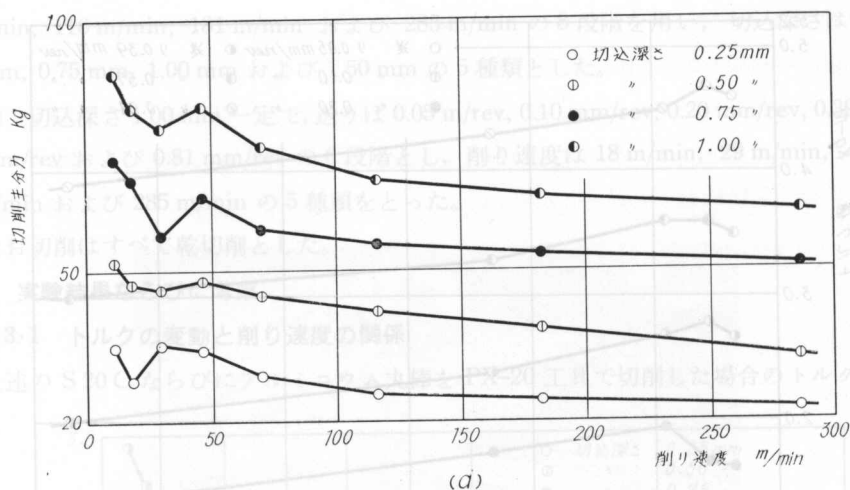
態を第3図, 第4図に示す。第3図は切込深さをパラメータとし, 第4図は送りをパラメータとした。

今回の実験では旋盤に無段変速機が装着されないため, 削り速度をより細かく区分できず, そのため削り速度の影響によるトルク値の変化を精密にプロットできなかつたうらみがあるが, それでも求められた点を直線で結ぶことによって, 変動の傾向は充分把握することが出来た。

旋削の場合, 被削材の回転に抗して工具によって発生するトルクの変動は, 明らかに切削の際の切削主分力によるものであり, そのため切削主分力について考察することが必要となる。

まず第3図(a)から, 軟鋼を旋削した場合のトルクの変動を見るに, 切込深さが増大すれば切削力も増大することに対応して, トルク値も切込深さが大きくなるに従って増大して居り, その増大する割合は, ほぼ切込深さに比例していることがわかる。

さらに削り速度との関係を見るに, 削り速度が上昇するに従ってトルク値は単調に減少する傾向を示すが, ある削り速度より小になるとトルク値は減少して極小値に達し, ふたたび上昇することが見られた。この現象は削り速度の低い区間に生じているが, このことは金属の切削力の測定に際してすでに認められている^{3)~5)}が, これらのトルクに対応する切削主分力についての実験結果は第5図に示すように, 明らかに上述の現象を再現している。



第5図 切削主分力と削り速度の関係

工具: PX-20 (33型) 被削材: (a) S20C, (b) アルミニウム
送り 0.32 mm/rev 一定

このように、第3図、第5図から、トルクの変動が切削主分力の変動とほぼ同一の形態で進行することがわかり、トルクの測定によって切削主分力の動向を把握することができると言えよう。

つぎに被削材が異なる場合のトルクの変動について検討して見る。第3図(a)は被削材としてS20Cを用い、(b)はアルミを用いた場合であるが、アルミの場合もS20Cの場合で述べた同じ現象をもとにして、ほぼ似かよった変動の状態を示している。ただ(b)は被削材が軟質であるため、トルク値は全体として(a)と比較して、かなり低い値をとっており、そのためトルク値のスケールは(a)の場合の2倍の大きにとって、変動状況を明らかになるよう考慮した。

特にここで気をつくことは、(a)において極小値をとってから次に上昇するトルク値の山の位置が、切込み深さが減少する(0.25 mm)と左側に移動しているが、(b)の場合は切込み深さが

最大の 1.50 mm の場合にはほぼ相当し、切込深さが 1.50 mm より減少すると、その山はさらに左に移動していることである。その際、極小値に至るトルクの減少過程は、今回の測定では現われていないが、さらに低速な速度域において発生しているのか、あるいは極小値をもたずに減少する⁶⁾ものと思われる。これは S20C とアルミという材質の相異による現象と考えられる。(アルミの切削の場合、低速域においては刃先に切屑が溶着し、1 回ごとに丁寧に除去して切削を行なうことを余儀なくされた。)

これらから、被削材を軽切削またはそれに近い状態(軟質材の切削など)で切削する場合、極小値の後にくるトルク値の山の位置は次第に低速側に移動することが認められ、対応する切削主分力についても、第 5 図からほぼ一致する現象が把握された。

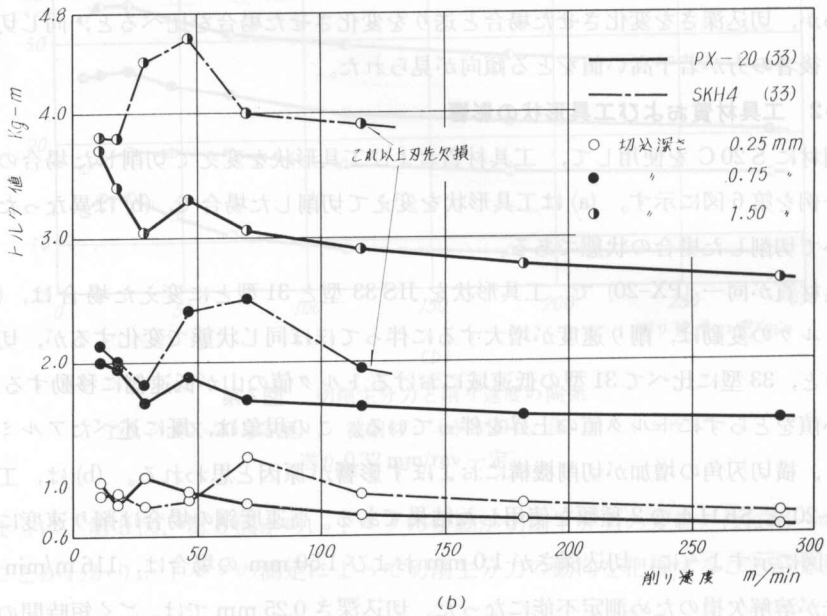
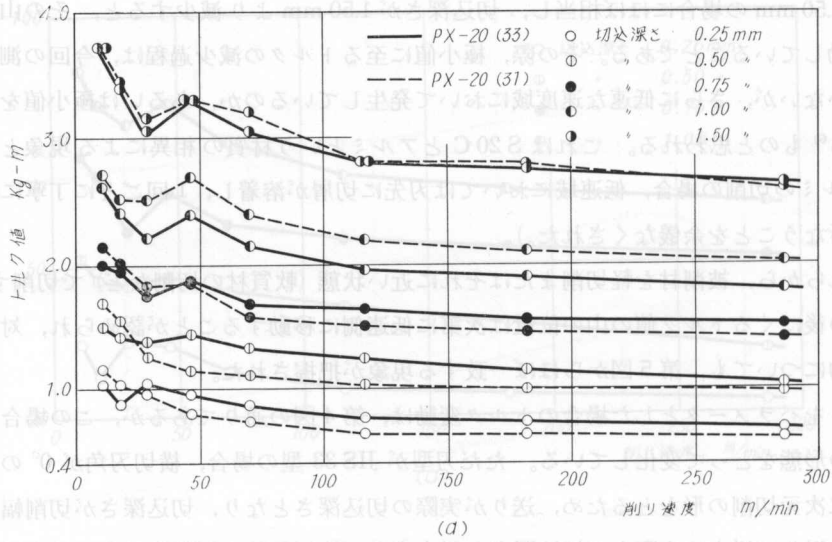
送りをパラメータとした場合のトルク変動は、第 4 図の通りであるが、この場合も第 3 図と類似の形態をとって変化している。ただ刃型が JIS 33 型の場合、横切刃角が 0° のため、切削が準二次元切削の形をとるため、送りが実際の切込深さとなり、切込深さが切削幅に相当するため、送りの増大は実際上の切込深さを増大することになり、切削時のくい込み現象が影響するためか、切込深さを変化させた場合と送りを変化させた場合を比べると、同じ切屑面積において、後者の方が若干高い値をとる傾向が見られた。

2.3.2 工具材質および工具形状の影響

被削材に S20C を使用して、工具材質および工具形状を変えて切削した場合のトルクの変動の一例を第 6 図に示す。(a) は工具形状を変えて切削した場合で、(b) は異なった材質の工具を用いて切削した場合の状態である。

工具材質が同一(PX-20)で、工具形状を JIS 33 型と 31 型とに変えた場合は、(a) に見るようにトルクの変動は、削り速度が増大するに伴ってほぼ同じ状態に変化するが、切込深さが減少すると、33 型に比べて 31 型の低速域におけるトルク値の山が低速側に移動するか、あるいは極小値をとらずにトルク値の上昇を伴っている。この現象は、既に述べたアルミの場合に似て居り、横切刃角の増加が切削機構におよぼす影響が原因と思われる。(b) は、工具材料として PX-20 と SKH 4 の 2 種類を使用した結果である。高速度鋼の場合は削り速度に限界があるので、図に示すように、切込深さが 1.0 mm および 1.50 mm の場合は、116 m/min の削り速度で刃先が溶解欠損のため測定不能になった。切込深さ 0.25 mm では、ごく短時間の切削で刃先の損耗を防ぎながら、一応所定の削り速度の全域にわたって測定を行なうことができたので、図上にプロットしたものである。

ただこの場合、記録波形が立ちあがり後安定するまでの一定時間切削を継続できなかったため、トルク値としてはやや不十分な値が含まれる可能性を考慮しなければならない。この図で明らかなことは、工具に SKH 4 を用いた場合、低速域におけるトルク値の山が著しく高い値をとることと、その位置が高速側(図中右方向)に移動することである。トルク値がそれから以後は削り速度の増加とともに減少することは、切込深さ 0.25 mm の場合から充分推定でき



第6図 トルクの変動におよぼす工具材質および形状の影響
被削材: S 20 C 送り 0.32 mm/rev 一定

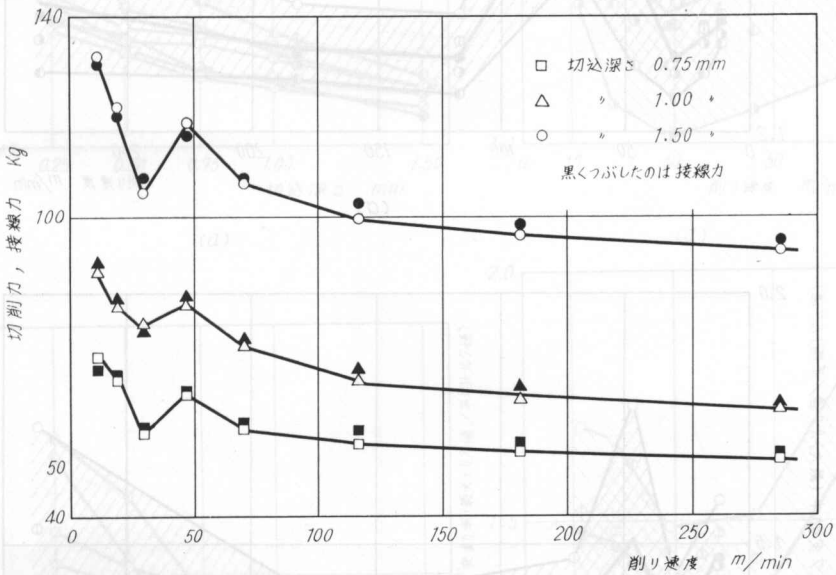
SKH の場合も総体的には、PX-20 の場合と同様な傾向を示すものと考えられる。

工具材料、工具形状ならびに被削材質の異なった組合せによって、組織的、機構的な原因から切削力の大きさに変動のあることは既に明らかにされているが^{6)~8)}、これらのトルク変動も、そうした切削力の変動に対応していることを示すものと思われる。

2.3.3 切削主分力と接線力の比較

つぎに測定されたトルク値から実際の切削主分力の大きさを求める問題となるが、トルクを発生させる力は、工具刃先によっておこる被削材表面における接線力であり、これが原理的には切削動力計によって記録される切削主分力と一致するはずなので、被削材の半径でトルク値を割り接線力の値を求めてみた。

トルクの腕の算定には、切削によって切込深さだけ直径が減少することを考慮して、切削力の集中点を切込深さの midpoint と見なして計算を行なった。計算によって求めた接線力の値を切削主分力のグラフ上にプロットしたものが第7図である。



第7図 切削主分力とトルクより求めた接線力の比較

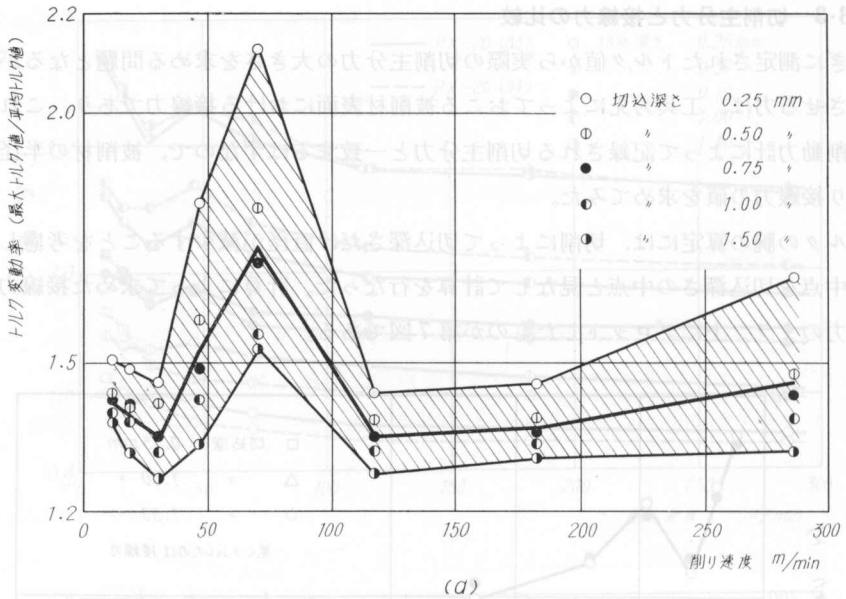
工具: PX-20 (33型) 被削材: S20C

送り 0.32 mm/rev 一定

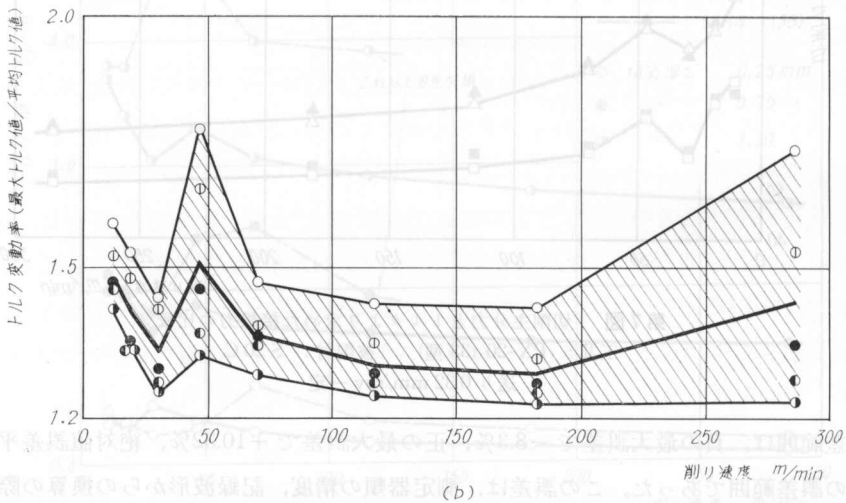
誤差範囲は、負の最大誤差で -8.3%、正の最大誤差で +10.32%、絶対値誤差平均として 3.67% の誤差範囲であった。この誤差は、測定器類の精度、記録波形からの換算の際の測定の誤差などとともに、トルクという間接的な現象を媒介とするための条件誤差も当然考えられることであり、さらに正確な測定を期待しなければならないが、この程度の誤差でも数値的には充分所要切削力 (主分力) の算定に資することができると思われる。

2.3.4 トルク変動率と振幅歪

トルク変動を示す記録紙上の歪波形から求めた最大トルク値と平均トルク値の比をトルク変動率としてグラフに示したものが第8図、第9図、第10図および第11図である。これはそれぞれの削り速度において、切削力によって回転軸におよぼすねじり歪のふれの割合をトルク値について考えたもので、回転軸に作用する振動の一要素としてその分析を行なってみた。



(a)



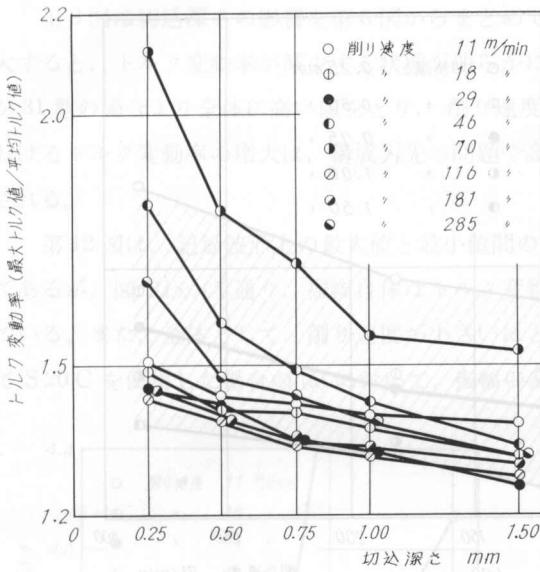
(b)

第 8 図 トルク変動率と削り速度の関係 (I)

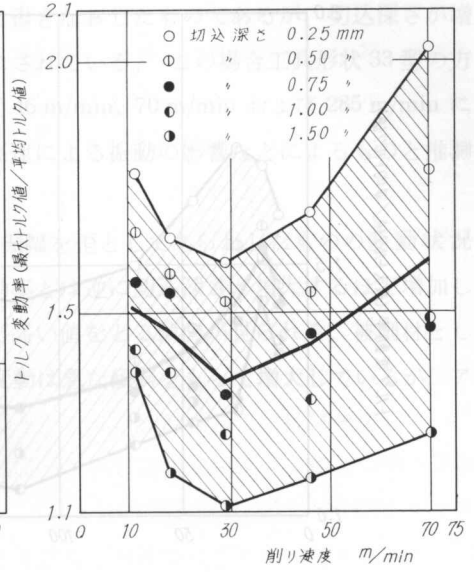
被削材: S20C 工具: (a) PX-20 (33型), (b) PX-20 (31型)

各図を通じてわかることは、切込深さが減少するほどトルク変動率が增大していることである。このことは、それぞれの削り速度において、切込深さが減少するとともに低くなるトルク値 (平均トルク値) の割合に対して、最大トルク値と最小トルク値との間の距離すなわち振幅を生ずる歪の変動がそれに比例して減少せず、割合としては増大することを示しているものと言えよう。

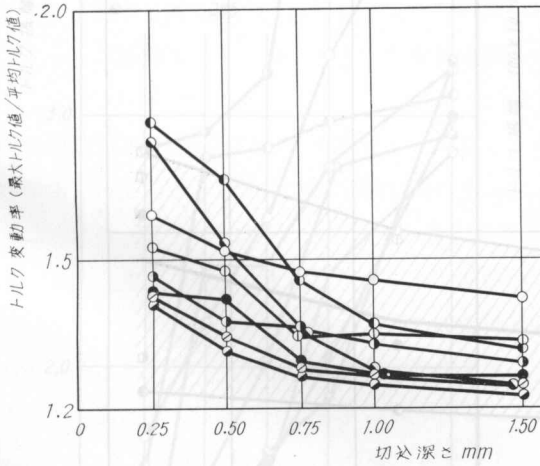
変動率と削り速度との関係は、図において上縁値および下縁値をそれぞれ結んだ線で囲ま



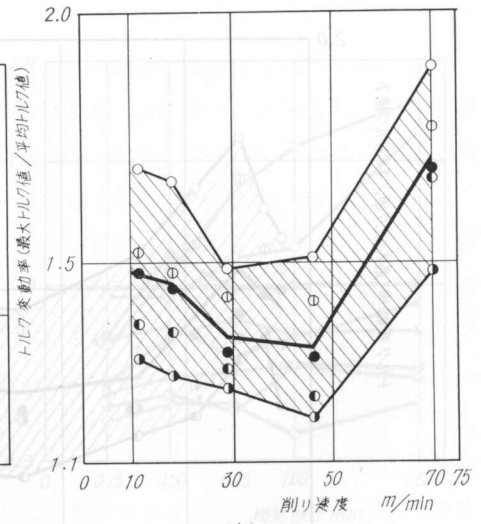
(a)



(a)



(b)



(b)

第9図 トルク変動率と切込深さ

被削材: S 20 C

工具: (a) PX-20 (33型)

(b) PX-20 (31型)

第10図 トルク変動率と削り速度の関係 (II)

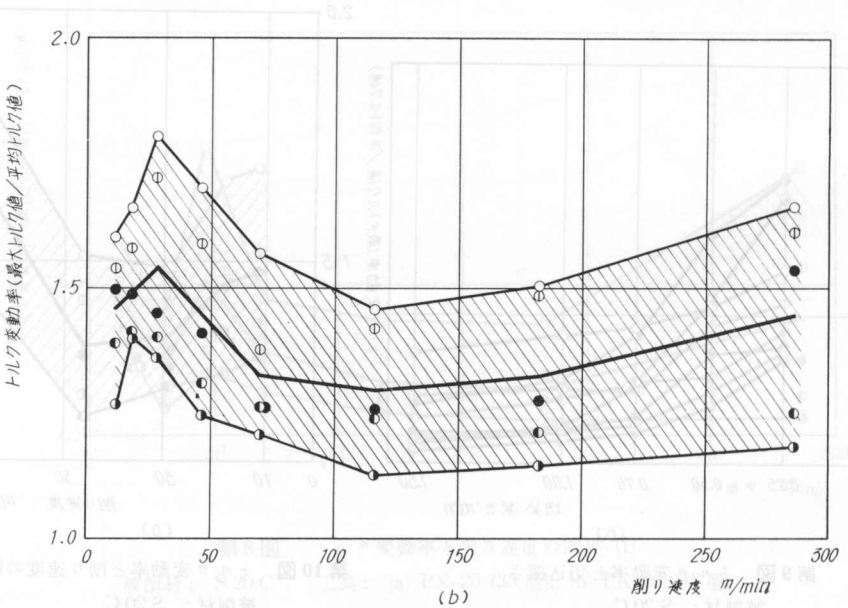
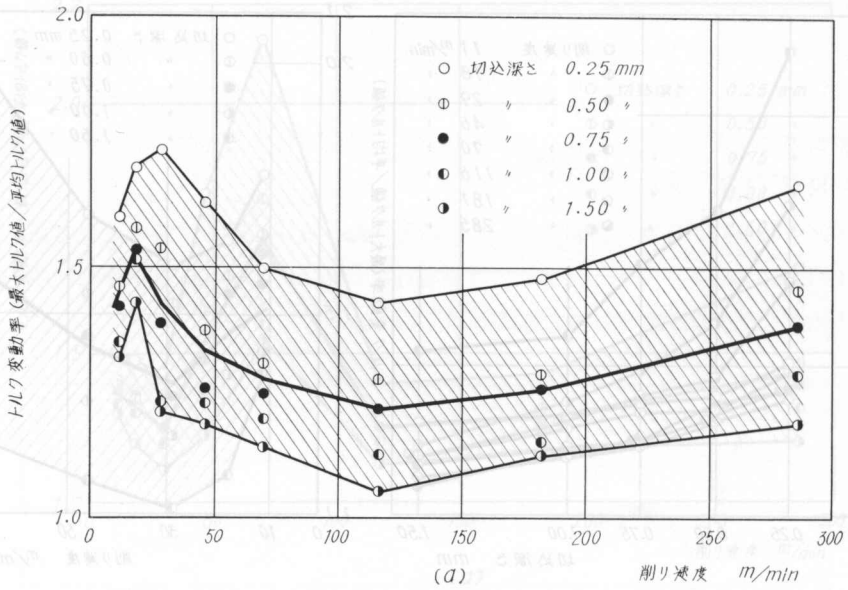
被削材: S 20 C

工具: (a) SKH 4 (33型)

(b) SKH 4 (31型)

れる図形からおおよその傾向が推定できるが、平均値を結ぶ太い実線によって、さらにその推移を明らかに知ることができる。その形態は先に示したトルク値の変動のそれと類似しているが、削り速度が増大すると単調に増大する点が異なっている。

これは、変動率は明らかに各削り速度におけるトルク値を反映しているが、削り速度が増



第 11 図 トルク変動率と削り速度の関係 (III)

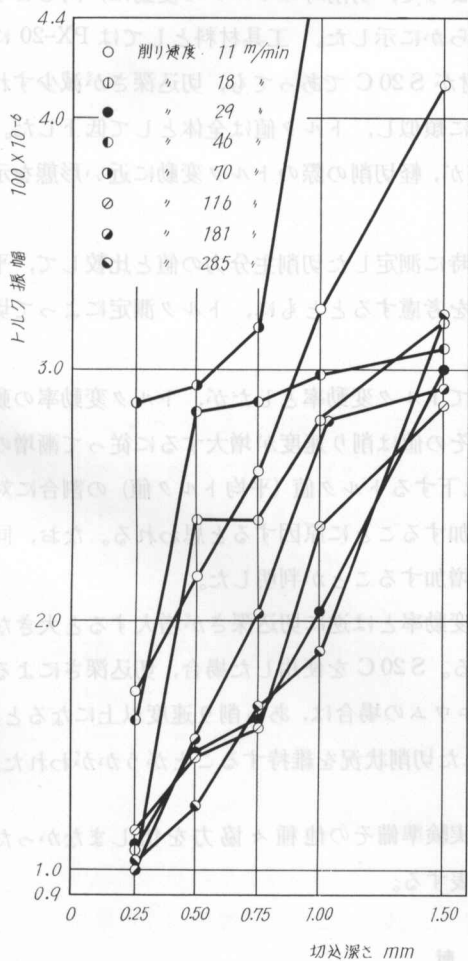
被削材: アルミニウム 工具: (a) PX-20 (33 型), (b) PX-20 (31 型)

大するにつれて、トルクによるねじり歪の変動を示す振幅が増加する為と考えられる。

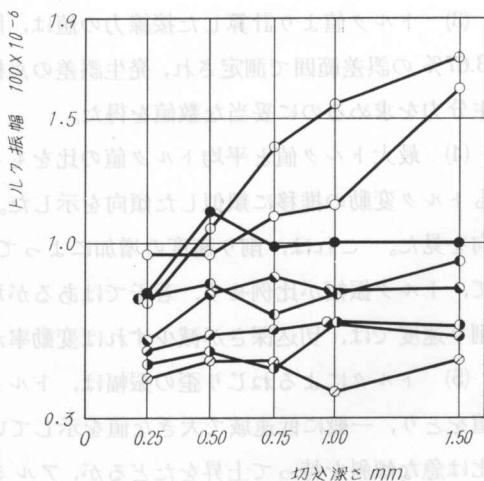
工具材料として PX-20 を使用した第 8 図、第 11 図に比べ、SKH 4 を用いた場合の第 10 図において激しい変動が示されていることは、工具による適正削り速度の問題と関連して検討されねばならない。

第9図は切込深さの影響を第8図からまとめて書きなおしたものであるが、切込深さが増大すると、トルク変動率が減少する状態が明らかにされている。この場合工具形状33型の方が31型の場合より全体に高い値をとり、削り速度46 m/min, 70 m/min および 285 m/min におけるトルク変動率の増大は、構成刃先の問題や高速による振動の影響などによるものと推測される。

第12図は、記録波形上の最大値と最小値間の振幅を歪としてあらわしたものの変動状況であるが、図でわかる通り、振幅自体はトルク変動率とは逆に切込深さが増大するほど増加している。また、全体として、削り速度が小さいほど高い値をとる傾向が見られる。被削材としてS20Cを使用した場合の(a)において、振幅の変動は急な傾斜をもって増大しているが、ア



(a)



(b)

第12図 最大トルク値から求めたトルク振幅歪

工具: PX-20 (33型) 被削材: (a) S20C, (b) アルミニウム

ルミの場合は、(b) に示す通り削り速度がある値以上になると、傾斜は殆んどなくなり一定値に近づき、安定した切削状況を保つことが認められた。

3. 結 言

以上、S20C およびアルミニウムを用いて旋削を行なった際のトルク変動についての実験から次のような結論を得た。

(1) トルク変動と削り速度との関係は、切込深さを変えた場合も、送りを変えた場合もともに、切削主分力の変動に対応したグラフを示し、トルクを測定することによって切削力の動向を知ることができる。

(2) 被削材質、工具形状ならびに工具材質によって、切削時のトルクの変動は、同じようにその際の切削主分力の変動に対応した形態を明らかに示した。工具材料としてはPX-20に対してSKH4の方が切削変動が大であり、被削材がS20Cであっても、切込深さが減少すれば、アルミニウムのような軟質材を切削する場合に類似し、トルク値は全体として低下した。工具形状については、JIS33型よりJIS31型の方が、軽切削の際のトルク変動に近い形態を示した。

(3) トルク値より計算した接線力の値は、同時に測定した切削主分力の値と比較して、平均3.67%の誤差範囲で測定され、発生誤差の点検を考慮するとともに、トルク測定によって切削主分力を求めるのに妥当な数値を得た。

(4) 最大トルク値と平均トルク値の比をもってトルク変動率としたが、トルク変動率の動向もトルク変動の推移に類似した傾向を示した。その値は削り速度が増大するに従って漸増の傾向を見た。これは、削り速度の増加によって低下するトルク値(平均トルク値)の割合に対して、トルク振幅が比例せず、若干ではあるが増加することに原因すると思われる。なお、同一削り速度では、切込深さが減少すれば変動率が増加することが判明した。

(5) トルクによるねじり歪の振幅は、トルク変動率とは逆に切込深さが増大すると大きな歪値をとり、一般に低速域で大きな値を示している。S20Cを使用した場合、切込深さによる変化は急な傾斜を持って上昇をたどるが、アルミニウムの場合は、ある削り速度以上になると、切削深さに関係なく、殆んど変化を示さず、安定した切削状況を維持することがうかがわれた。

おわりに、本実験を通じ、実験装置の作製、実験準備その他種々協力を惜しまなかった千田、佐伯両技官と仲島教務職員に心から謝意を表する。

文 献

- 1) 奥島・徳永・田子：日本機械学会論文集，21-110(昭30)，709.
- 2) 茨城大学工学部機械工学実験研究会：標準機械工学実験法(昭36)，理工図書.
- 3) 奥島・岩田：日本機械学会論文集 28-187(昭37)，418.

- 4) ア・エム・ローゼンベルク, ア・エヌ・エレミン: 金属切削理論 (1965), 東京図書.
- 5) N. N. Zorev: Metal Cutting Mechanics (1966), Pergamon Press.
- 6) 奥島・岩田・中谷: 日本機械学会論文集, 29-202 (昭38), 1016.
- 7) 田中・津和: 精密工作法 (昭36), 共立出版.
- 8) 切削加工技術便覧編集委員会: 切削加工技術便覧 (昭37), 日刊工業新聞.

昭和47年10月31日受理

Studies on the Emissivity of Radiation Surface of Radiant Heating Systems

By Kinio KANAYAMA

The power of radiant heating systems is affected by the emissivity of the radiation surface. The author, at the temperature 100 to 250°C, carried out measurements of the emissivity of the radiation surface materials and comparisons between the measured and the theoretical ones derived by E. M. Sparrow and others. The obtained results are as follows:

Plastics and heat-resisting paints, the values of whose emissivity are large, are more effective than metals for radiation surface. It is an effective method of raising the emissivity to increase surface roughness.

1. ま え が き

温水を用いたふく射暖房は、工場、体育館および格納倉など、天井の高い、また換気量が多い建物の適しており、最近、わが国においても次第にこの方式に対する関心が高まる中で、その実施例¹⁾をみるにいたった。また一方、ふく射暖房のプラントテスト²⁾、炉テスト³⁾による放熱器の性能値測定が行なわれ、パネル表面のふく射率がその性能値に大きく影響をもつとされている。そこで、この研究においては、パネル表面用材料、その他放熱器材料の比較的低温度 (100~250°C) における垂直全ふく射率を測定し、ふく射熱量の計算機器設計の資料に供するとともに、材料表面の性状および温度などが、ふく射率におよぼす影響について実験的にたしかめ、ふく射理論を用いて定性的な比較、検討を行なった。

2. 固体ふく射の一般的性質⁴⁾

表面からのふく射特性は、大きく分けて、自由電子を含む金属と、それを含まない非金属材料とに相違している。一般に、金属からのふく射は物体内部の電子自体の運動に起因し、そのスペクトル分布は波長の短い方に多く、非金属のふく射は分子または原子の振動あるいは結晶格子の振動に起因し、波長の長い赤外線域が大部分を占めている。したがって、

1) 日本機械学会70周年記念北海道地区講演会 (昭42, 8, 28) にて一部発表。