

工具通水効果について

中藤 哲也*・酒井 義郎**・大草喜太雄**

Advantage of Imposing Water Pipe Flow on Tool Shank

Tetsuya NAKATO*, Yoshiro SAKAI** and Kitao OHKUSA**

Abstract

Cutting tool is, needless to say, the major participant in cutting and so we can get much information about the present cutting condition in operation with sensors attached to it. Moreover, we can improve cutting condition by processing tool itself like reforming tool shape, adding some device to it and so on. Water flow in a pipe through tool shank can have such functions as above. One of such functions of it is cooling effect. Examined here is this effect, changing water velocity and water temperature.

1. はじめに

機械加工の信頼性向上や工作機械の自動化、無人化のためには常時、工具の切削状態を監視することが必要である。これまでも、切削状態を監視する種々のインプロセスセンサ¹⁾が提案され開発されつつあるが、いずれも工具摩耗量の測定や工具損傷の検出に限られ、急速摩耗、びびり、切りくずの流出の仕方などを含む広汎な意味での切削状態を監視するセンサは、いまだに提案されていない。そこで、筆者らは次のような新しいセンサを提案し開発を進めている。すなわち、工具シャンク部に穴をあけ、そこに一定流速の水を通すことにより切削の情報を水に伝達し、その情報を下流側に設けた熱線流速計²⁾(流速センサ)によって変動流速の形で取出し、解析しようとするものである。

また工具通水は、工具異常検知機能を有しているだけでなく、二次的効果として得られる通水効果、すなわち冷却効果をも有している。そこで、本稿では、工具通水による通水効果に関して論じる。切削時に発生する熱は工具刃先温度を上昇させ、工具の損耗を助長したり、被削材の仕上面品位を低下させる。この切削熱を抑制する方法として、切削油剤による冷却法が一般的に用いられており、これは工具外部冷却法とも呼べるものであろう。切削油剤を用いると、工具寿

命を延ばしたり、被削材の寸法精度の低下を防ぐことができるという長所がある反面、工具内の温度勾配を急にするため大きな熱応力が生じ、き裂が発生しやすくなるなど短所もある。一方、工具通水効果は工具内部冷却による効果である。工具内側からの冷却は、切削油剤使用による冷却と比較して、工具内の温度勾配を緩やかにすると思われ、その結果、チッピングの減少、き裂発生抑制などが考えられる。また、工具内部冷却切削による工具内の温度勾配と乾式切削によるそれを比較すると、前者の方が大きいと思われ、工具と切りくずの接触長さの減少、またカール半径の増大も考えられるが、このカール半径の増大は工具外部冷却法によるその増大よりも小さいであろう。この工具内部冷却法に関する研究も行なわれており、工具内部冷却切削は乾式切削に比べて、工具寿命の増大、切削抵抗の減少などが認められるという報告³⁾⁴⁾⁵⁾がなされている。なお本稿での通水効果の評価は、間接的ではあるが、刃先温度に対応するものとして、前逃げ部の表面温度、通水穴下流側で工具台寄りのシャンク部の表面温度、切削抵抗の背分力ドリフト量で行なった。

2. 実験装置および方法

通水工具を Fig. 1 に示す。工具の通水穴は送り分力方向におけられており、その位置は工具先端より 22 mm、工具下面より 5 mm であり、その直径は 4.1 mm である。穴の両端部には座ぐり部が設けてあり、

* 大学院生産機械工学専攻

** 生産機械工学科

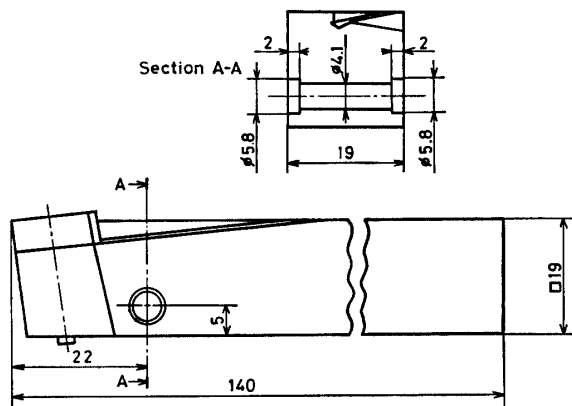


Fig. 1 Tool with a through hole.

ここで通水用パイプと連結される。通水工具のたわみ量と通常の工具のそれとの比は、有限要素法⁶⁾を用いた数値計算によると、最大でも約6%となり、通水工具の静剛性と通常の工具のそれとはほとんど差異はない。また、同法による固有振動数の計算結果には、通水工具と通常の工具に大きな差は認められず、動剛性についても差異は少ないものと考えられる。したがって、通水工具による切削における剛性上の問題はない。有限要素法で用いた要素は、1次の変位関数を有する三角形要素であり、応力状態は平面応力状態である。

工具冷却に主眼を置けば、冷却液として液体ガスや液体金属などが考えられるが、筆者らの主目的は、水を工具にあけた穴に通すことにより切削状態を監視するシステムを開発することであり、冷却液は水である。次に、通水装置の配管系を Fig. 2 に示す。水道より出た水は、流速安定用バッファ、2個の給水用タンク

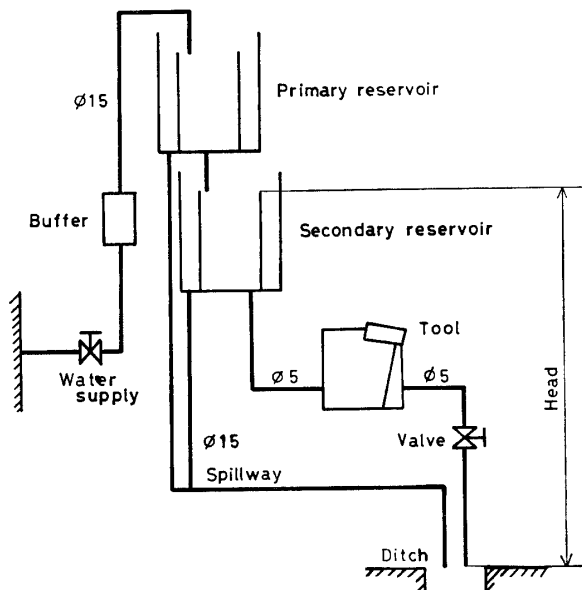


Fig. 2 Schematic of water flow system.

を通り、通水工具に導かれる。給水用タンクの上端から水があふれ出る状態を保つことで、水頭が一定となり、一定流速が得られる。この給水用タンクを2個用いて、より乱れの少ない水を通水工具に供給した。そして発達した流れを得るために、上流側に通水穴直径の50倍、すなわち約200mm以上、下流側に30倍、すなわち約120mm以上の直線部分を設けた。また、それぞれのパイプには気泡やゴミの侵入を防ぐためフィルタを設けた。

実験は、切削速度、送り、切り込みをそれぞれ100 m/min, 0.15 m/rev, 1.5 mm で固定し、切削時間、通水の有無、流速、水温という条件を変化させて、外周旋削で行なった。工具は超硬合金工具 P20(-5°, 4°, 5°, 6°, 15°, 15°, 0.8 mm) を用いた。被削材としては S45C 焼きならし材の丸棒を使用した。また通水を行わない切削においても、通水穴を有する同一形状のシャンクを用いた。

通水効果の評価を行なう上で、観測する量としては種々の量が考えられるが、今回は観測が容易な前逃げ部の表面温度（以下前逃げ部温度と呼ぶ）と通水穴下流側で工具台寄りのシャンク部の表面温度（以下シャンク部温度と呼ぶ）を採用した。それらの測定位置を Fig. 3 に示す。温度の測定には温度ゲージ⁷⁾を用いた。温度ゲージの示す温度は、Fig. 3 に示す斜線部の平均温度である。また、切削熱により動力計の零点、すなわち切削抵抗の零点がドリフトするが、その量が3分力の中で最も大きい背分力のドリフト量（以下ドリフト量と呼ぶ）も観測量として取上げた。ドリフトの測定には、AST 式 TTH 型切削工具動力計（三保電機

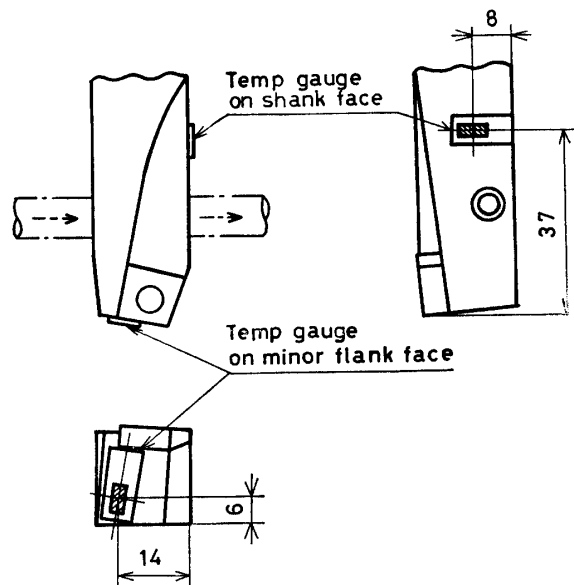


Fig. 3 Temperature gauge locations.

K.K. 製) を用いた。切削は、温度ゲージの出力、ドリフト量がともに零点に復帰した時点より開始した。なお、切削時に生成される切りくずからパイプや温度ゲージを保護するためにガードを設けた。

3. 実験結果および考察

水によって物体の熱が持ち去られるとき、水温一定の場合には、流速の増加にともない熱伝達率が增大することは、伝熱工学⁸⁾の上でも知られている。また流速一定の場合には、水温の低下にともない熱伝達率が增大することも、同様に知られている。そこで考えられることは、熱伝達率の増大が通水効果の増大をもたらすということである。実験時の水温、気温とも 20°C~22°C の範囲にあり、それらの 2°C の温度差が実験結果にどの程度の影響を及ぼすか定かではないが、特に明記しない限り、水温、気温とも上記温度範囲の中央値 21°C で一定であるとする。レイノルズ数 $Re=0$ は通水しない場合を示す。

3.1 流速による通水効果の相違

Fig. 4 に流速の違いによる前逃げ部温度とシャンク部温度の推移を示す。この場合、水温は一定 (21°C) であるので、レイノルズ数の違いは流速の違いに相当する。レイノルズ数 $Re=2608, 3627$ はそれぞれ流速で 63 cm/sec, 87 cm/sec である。前逃げ部温度については、通水しない場合には切削にともない次第に温度が上昇しており、300 秒後でも正の温度勾配を有しているのに対し、通水した場合 (レイノルズ数 $Re=2608$) には 120 秒~150 秒で温度は最大値に達し、その後わずかに低下し、それからの温度勾配ははっきり

とした温度上昇を示すものではない。このように通水した場合、温度勾配が非常に小さくなったのは、切削による熱の流入量と通水により奪われる熱量が釣り合った状態になっているためであろう。通水効果が前逃げ部温度の変化として顕著に現われるには、150 秒位かかっている。そして通水した場合と通水しない場合の 300 秒後の温度差は 30°C であり、比としては 2/3 である。レイノルズ数 $Re=3627$ の前逃げ部温度のデータは 150 秒までしか得られていないが、それまでの推移を見る限り、この程度の流速の増加では、前逃げ部温度の低下はレイノルズ数 $Re=2608$ の場合と同程度であると思われる。これは、シャンク部温度でも同様である。通水した場合と通水しない場合の、300 秒後のシャンク部温度の比は 1/2 であり、同時間の前逃げ部温度のそれと比較して小さく、より顕著に通水効果が現われている。これは、シャンク部温度の測定位置が前逃げ部温度の測定位置と比較して、通水穴に近いためであろう。また、通水した場合のシャンク部温度は、180 秒以降においてほとんど増加しておらず、それ以前の測定値より低下しているものさえあり、飽和状態に達しているものと思われる。

切削中においてはドリフト量の測定はできないので、切削終了時よりのドリフト量の推移を求めた。Fig. 5 に通水の有無によるドリフト量の推移を示す。切削時間は 300 秒であり、通水した場合のレイノルズ数は 2608 である。通水した場合は通水しない場合と比較して、切削終了時のドリフト量で 1/2、また最大ドリフト量で 3/7 まで低下しており、通水を行なうことの有効性がドリフト量の測定においても示された。また、通水の有無に関係なく、切削終了後でもドリフトが大きくなり、最大ドリフト量に達するまで時間がかかっ

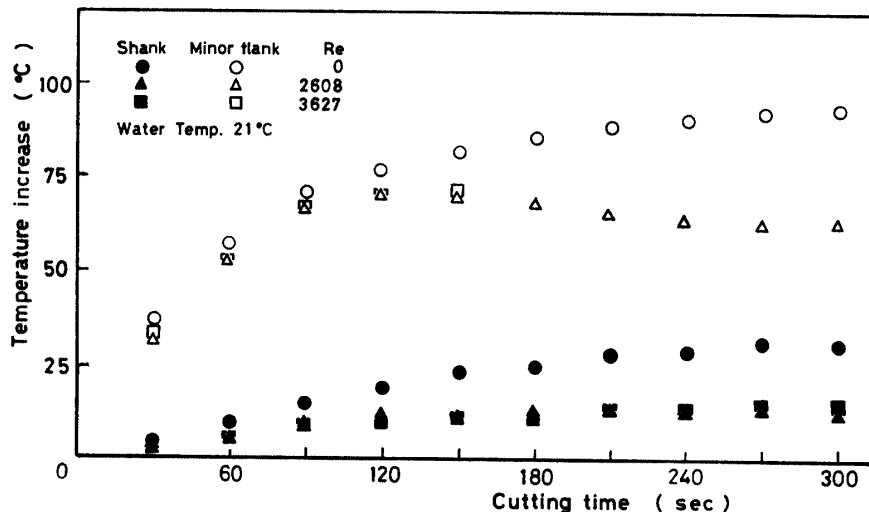


Fig. 4 Temperature variations with cutting time.

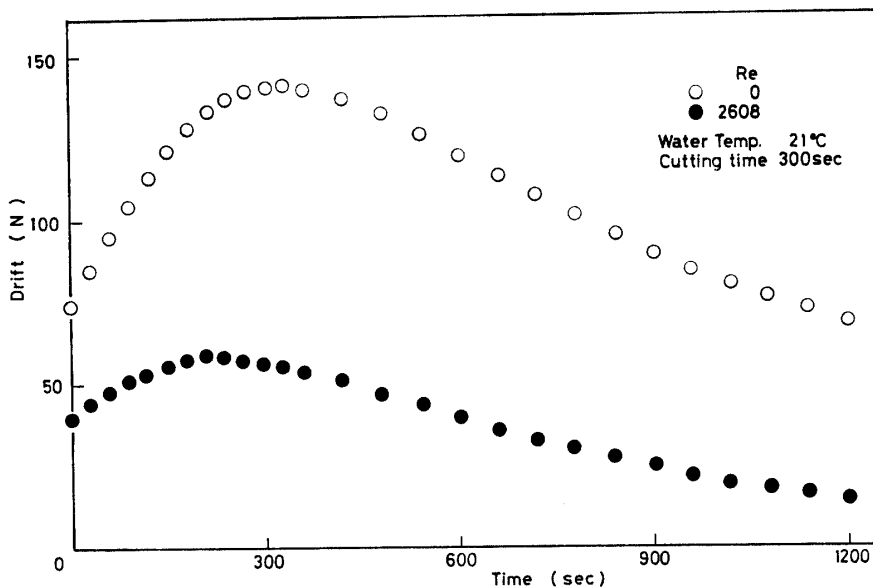


Fig. 5 Drift behaviors after cutting in thrust force measurement.

ているが、この遅れ時間は、熱が工具後方まで十分に伝達されるために費される時間であろう。

Fig. 6 には、切削時間をパラメータとした最大ドリフト量と流速の関係、また切削終了時のドリフト量と流速の関係を示す。水温は一定であるので、レイノルズ数の増加は流速の増加を意味する。なお、切削時間60秒での切削終了時のドリフト量には、熱の伝達特性の問題が大きく関係しており、それに関しては後に述べることにし、ここでは特に取上げない。レイノルズ数 $Re=3500$ 以上の条件下での通水効果については、実験を行っていないのでわからないが、Fig. 6 より

レイノルズ数 $Re=2500\sim3500$ の範囲では通水効果は同程度であることがわかる。このことは、前述したように前逃げ部温度とシャンク部温度の測定においても認められる。

3.2 ドリフトと切削熱との関連について

ドリフトの発生が切削熱に起因していることは、第2節で述べた通りである。ここでは、切削終了からもシャンク部温度の増加が観測されることに着目し、Fig. 7 に示す最大ドリフト量と切削終了からの最大シャンク部温度との関係を取上げて、定性的ではある

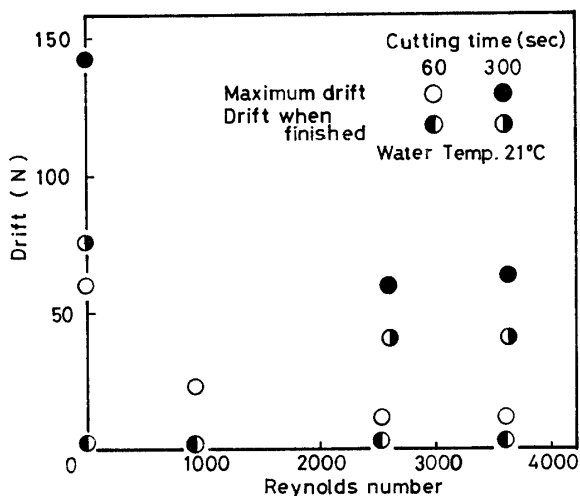


Fig. 6 Effects of water velocity and cutting time on the values of drift at the end of cutting and of maximum drift.

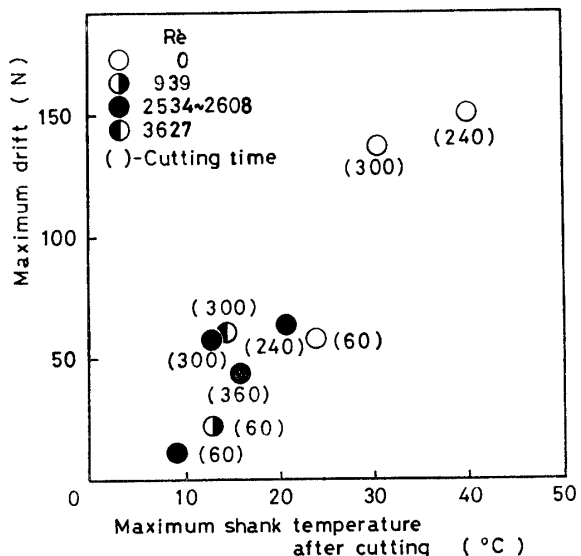


Fig. 7 Relation between maximum drift and maximum shank temperature near the hole.

が、ドリフトと切削熱との関係について述べる。Fig. 7 において括弧で囲んだ値は切削時間である。ここで取上げた温度はシャンク部温度であり、動力計のひずみ検出部の温度ではないので、直接的ではないが、ドリフトと切削熱との一応の関係がつかめるであろう。温度の上昇につれ、最大ドリフト量は急激に大きくなっており、その増加のし方は非線形（放物線的）な挙動を示している。この非線形な挙動には、熱の伝達特性が大きくかかわっているものと思われる。しかし、ひずみ検出部の温度を直接観測したなら、温度変化とひずみの関係よりドリフトと温度との間には、線形な関係が得られるであろう。Fig. 8 には、切削終了後、最大シャンク部温度を与える時刻 t_m から切削終了時刻 t_f を差引いた時間 $\kappa = t_m - t_f$ と切削時間との関係

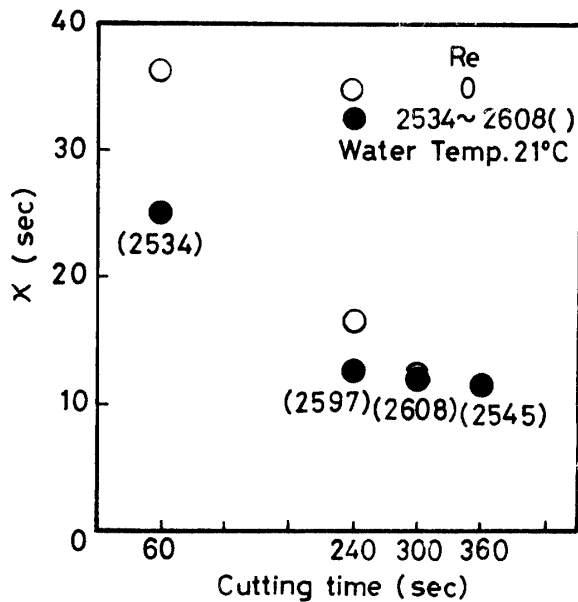


Fig. 8 κ versus cutting time.

係を示す。Fig. 8 において括弧で囲んだ値はレイノルズ数である。切削時間の増加にともない κ は非線形な曲線を描いて減少しており、通水した場合には切削時間 240 秒以後、 κ の値は約 12.5 秒の一定値を取る。この 12.5 秒という時間は、温度伝導率に関係するものであると考えられる。また、通水しない場合でも通水した場合と同様に κ の値は、12.5 秒前後の一定値に収束するであろう。ただし、十分長い時間の切削においては、工具摩耗により発生熱量が増加するため、 κ の値はさらに減少するものと思われる。Fig. 7, 8 より、Fig. 6 の切削時間 60 秒での切削終了時のドリフト量が通水の有無、流速の大小にかかわらず、ほぼ同一の小さい値を示していることが説明できる。すなわち、切削により発生する熱を工具後方（ひずみ検出

まで伝達する時間として 60 秒という値では十分でないため、工具後方まで伝達される熱量が少く、通水の有無、流速の大小の比較において、ドリフト量に差が生じなかったものと考えられる。

次に、最大ドリフト量と切削時間の関係について Fig. 9 に示す。図中において括弧で囲んだ値はレイノルズ数である。通水しない場合切削時間とともに、最大ドリフト量は、ある程度のばらつき* を有しているものの増加の傾向にある。また、切削による工具摩耗量の増大から生じる切削熱量の増加を考えれば、この最大ドリフト量が切削時間の増加にともない、わずかではあるが増大していく傾向は続くであろう。通水した場合には、切削時間 240 秒における値が最も大きく、それ以上の切削時間で値は小さくなっている。これ

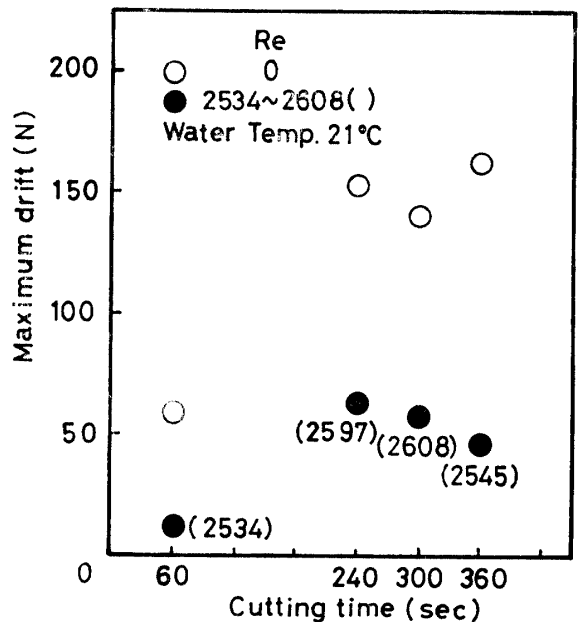


Fig. 9 Maximum drift versus cutting time.

には、通水を行なうことで脚注に述べたシステム雑音に関連する要因が大きくなった結果としての、システム雑音分散の増大だけによるものではなく、何らかの熱的な作用が関係するものと思われる。切削時間 240 秒以前（例えば 120 秒、240 秒）、また切削時間 360 秒以降の実験結果がないので、十分な言及はできないが、Fig. 4 のシャンク部温度については、180 秒以降ほとんど変化が見られないことから考えると、切削時間 240 秒以上の切削においても、シャンク部温度の測定部分から工具の後方に伝達される熱量はほとんど変わらず、一方で、切削時間が長くなった分だけ、工具後方

*ばらつきは、現象それ自体に関係したシステム雑音と測定の際生じる観測雑音（測定誤差）によって生じる。

(ひずみ検出部)に通水効果が波及し、切削時間 240 秒の最大ドリフト量が切削時間 300 秒, 360 秒のそれよりも大きくなったものではないかと思われる。ただし、工具摩耗量増大による切削熱量の増加を考えると、通水した場合の最大ドリフト量もその後、増加傾向を示すと思われるが、その増加率は、通水しない場合のそれと比較して非常に小さいであろう。また、通水の有無に関係なく、切削時間に対する最大ドリフト量の挙動が、Fig. 4 に示すそれぞれの場合の前逃げ部温度の挙動と同一であるということにより、いままで述べた推論の妥当性が裏付けられる。Fig. 4 に示す通水した場合のシャンク部温度に極大値が存在しないのは、第 3.1 節で述べたようにシャンク部温度の測定位置が通水穴に近く、通水効果が大きかったためであろう。

最大ドリフト量と切削時間に関連して、切削終了から最大ドリフト量に達するまでの時間と切削時間に関して述べる。最大ドリフト量に達する時刻が、分解能の点から明確に決定できなかったため、最大ドリフト量の 90% に達する時刻 t_{90} から切削終了時刻 t_f を差引いた時間 $\tau = t_{90} - t_f$ を最大ドリフト量に達するまでの時間として用いる。Fig. 10 に τ と切削時間の関係

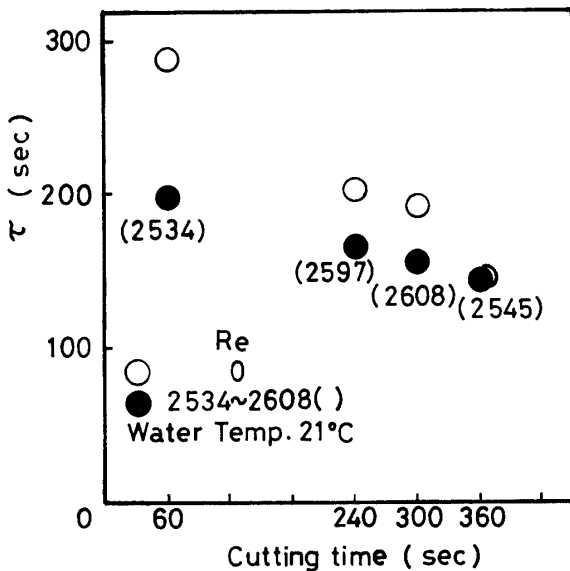


Fig. 10 τ and cutting time.

を示す。切削時間の経過にともない τ は、通水の有無に関係なく、直線的に減少しており、切削時間 60 秒では通水しない場合の τ の値が通水した場合のそれより大きい、切削時間 360 秒での τ の値の大きさは逆転している。切削終了から最大ドリフト量に達するまでの時間と切削時間には、Fig. 8 のような非線形な関係が存在するはずであるが (Fig. 5 参照), τ を

用いることで、その非線形性を構成している部分 (最大ドリフト量を示す近傍) が除かれ、Fig. 10 のような線形関係が得られたのではないかとと思われる。この τ の値も κ の値同様に一定値に収束するであろう。また、360 秒までなら同一切削時間において、 τ の値の大小で通水効果が評価できる。つまり、 τ の値が Fig. 10 の●印より大きければ、通水効果は●印より劣るということであり、●印より小さければ、通水効果は●印より優れているということである。Fig. 11 には、切削時間 60 秒での τ と流速の関係を示す。レイノルズ数 $Re=939$ での τ の値は、通水しない場合の τ の値とレイノルズ数 $Re=2534, 3596$ の τ の値との間に位置し、通水効果としてはレイノルズ数 $Re=939$ の場合の方がレイノルズ数 $Re=2534, 3596$ の場合より劣るということがわかる。

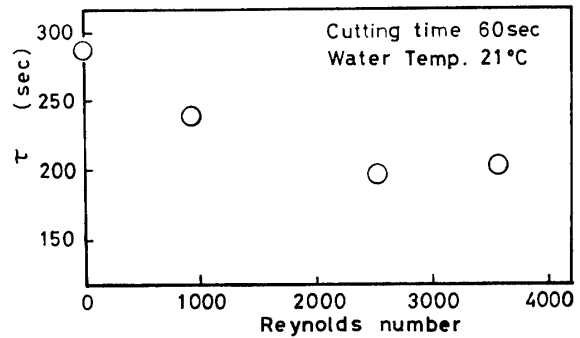


Fig. 11 Effect of water velocity on τ .

3.3 水温による通水効果の相違

Fig. 12, 13 は、それぞれ水温の違いによる前逃げ部温度の推移とドリフト量の推移である。切削時間は 240 秒である。レイノルズ数 $Re=1710$ における水温は 11°C 、流速は 53 cm/sec であり、Fig. 13 のレイノルズ数 $Re=2597$ におけるそれらはそれぞれ 21°C , 62 cm/sec である。水温 11°C の時の気温は 16°C である。Fig. 12, 13 は、水温 11°C の場合の方が水温 21°C の場合より通水効果が大きいことを示している。Fig. 12 の前逃げ部温度の推移より、切削時間 60 秒までは水温 11°C , 21°C いずれの場合も通水しない場合と温度上昇に差異はみられないが、水温 11°C の場合のそれ以後の温度上昇は、水温 21°C の場合と比較しても緩やかであることがわかる。水温 11°C の場合は水温 21°C の場合より 60 秒程度短い切削時間 90 秒で通水効果が顕著に現われている。Fig. 13 のドリフト量の推移では、水温 11°C の場合での切削終了時のドリフト量と水温 21°C の場合のそれとの差は小さいが、その後のドリフトの増加量が異なり、水温 11°C の場合

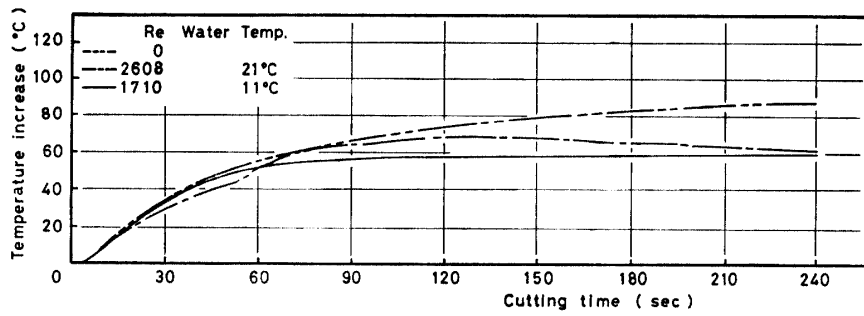


Fig. 12 Behaviors of flank face temperature.

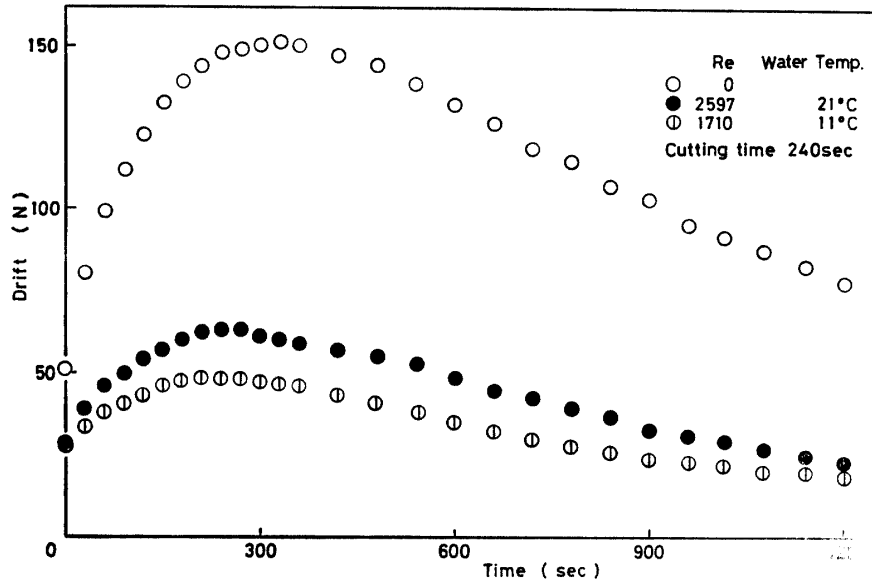


Fig. 13 Difference in drift behavior after cutting by changing water temperature.

の最大ドリフト量は水温 21°C の場合のそれと比べて約 3/4 に抑えられ、水温を下げることによる効果が現われている。水温 11°C の場合での τ の値は 133 秒であり、水温 21°C の場合の 169 秒 (Fig. 8 参照) より小さく、 τ の値の上からも通水効果が認められる。また、水温 11°C の場合の方が、水温 21°C の場合よりも流速が遅いにもかかわらず通水効果が大きいことより、水温の低下の方が流速の増加より通水効果に与える影響は大きいと考えられる。

4. あとがき

工具通水効果について、前逃げ部温度、シャンク部温度、ドリフト量を用いて検討した。工具通水の主目的は、工具通水による異常検知システムの開発にあり、通水効果は二次の効果であるので、通水効果としては今回の実験結果程度で十分であるといえる。また、動力計のひずみ検出部近傍の温度を温度ゲージなどを用

いて測定し、ドリフト量と温度との較正曲線を求めておけば、温度補償のための一方法とすることができる。今回の実験で以下の点が明らかとなった。

- 1) 水温 21°C の場合における通水効果はレイノルズ数 $Re=2500\sim3000$ の範囲では同程度である。
- 2) 水温を低下させることにより、通水効果は増大する。
- 3) 水温の低下の方が、流速の増大より通水効果に与える影響は大きい。
- 4) 長時間の切削においても、通水を行なうことにより、急激なドリフト量の増大を抑制することができる。

参考文献

- 1) 岩田一明：日本機械学会誌，**82**, 731 (1979)
- 2) Leslie S. G. Kovaszny: 東京大学宇宙航空研究所報告，**4**, 1(A) (1968)

- 3) 岡本定次, 土井雅博: 精密機械, **38**, 5 (1972)
 - 4) 岡本定次, 土井雅博: 精密機械, **41**, 5 (1975)
 - 5) 岡本定次, 土井雅博: 精密機械, **42**, 6 (1976)
 - 6) O.C. Zienkiewicz: The Finite Element Method in
Engineering Science, McGraw-Hill (1971)
 - 7) 温度計測部会編: 温度計測, 計測自動制御学会 (1981)
 - 8) J.P. Holman: Heat Transfer, McGraw-Hill (1976)
- (昭和57年4月20日 受理)