

## 技術論文


 Technical Paper

# 新生面摩擦試験による切削工具すくい面における 摩擦挙動の解明

八田武士<sup>\*1</sup>, 糸魚川文広<sup>\*2</sup>, 杉野 敦<sup>\*1</sup>, 木村利光<sup>\*1</sup>

## Elucidation of Friction Behavior on Rake Surface of Cutting Tool using Newly-Formed Surface Friction Test

Takeshi Hatta, Fumihito Itoigawa, Atsushi Sugino, and Toshimitsu Kimura

### Synopsis

*In an effort to improve thermal efficiency of power plants, the gas turbine engines used in combined cycle systems are much in demand. Super heat resistant alloys such as Inconel 718 are used in gas turbine disks. These materials are known as difficult-to-machine materials. Especially, chipping of cutting tools due to adhesion of work material is a serious problem in intermittent cutting such as milling process. In order to improve adhesion issues, the friction phenomenon at work-tool interface needs to be clarified. The purpose of this study is to make clear the friction behavior on rake surface of cutting tools using a newly-formed surface friction test.*

*Results obtained are as follows.*

- 1. Friction mode changed from coulomb friction to shear friction when adhesion to rake surface of a cutting tool occurred.*
- 2. Adhesion of work material to a cutting tool occurred in a short sliding distance by turning up initial tool temperature from 20 °C to 400 °C.*
- 3. As a result of investigating stress and temperature of contact area in work material, yielding of friction surface had caused adhesion to a cutting tool. And yielding ratio was proposed as a criterion which adhesion occurred.*

## 1. 緒 言

近年、環境保護の観点からエネルギー資源の効率的な活用が求められ、発電業界や航空機業界では熱効率を向上させるため、高温下で優れた機械特性と化学的特性を持つ超合金の適用が進んでいる<sup>1)</sup>。しかし、超合金は部材として優れている半面、熱伝導率が低いことから切削温度が著しく上昇し、また高い延性を示すことから凝着が生じ易く、難削性を示すことが知られている。特にフライス加工のような断続加工においては、凝着による切削工具の欠損が生じることが多く、切削効率の低下や、工具コストの増加が問題になる。これらの断続加工時の凝着による工具欠損を抑制するには、

被削材と工具間の摩擦現象、特に凝着現象のメカニズムを明らかにする必要がある。

被削材と切削工具間の摩擦現象に関しては、分割工具法<sup>2)</sup>や摩擦圧接を利用した手法<sup>3,4)</sup>により調査されているが、凝着が生じ始める臨界条件に関しては諸説<sup>5,6)</sup>存在しており、凝着が生じる摩擦面の温度や圧力の臨界値などの定量的な検討がされている事例が少ないのが現状である。

近年、糸魚川らにより、切削加工時の工具すくい面における摩擦の特徴である高温・高圧・新生面接触を再現できる摩擦試験法として、新生面摩擦試験法<sup>7,8)</sup>が提案されている。新生面摩擦試験法では、摩擦面の温度や応力を定量的に評価することができ、アルミニウ

2011年12月7日受付

\*1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research &amp; Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

\*2 名古屋工業大学大学院工学研究科, 工博 (Dr., Eng., Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology)

ム合金の切削加工において、凝着挙動に及ぼす潤滑油剤の影響などの評価が行われている。

そこで本研究では、糸魚川らによって提案されている新生面摩擦試験法を用いて、代表的な超合金である Inconel 718 の切削加工における工具すくい面の摩擦状態を再現し、被削材-工具間の摩擦現象を調査した。また、凝着が発生する臨界条件の調査もを行い、摩擦モデルを検討した。

## 2. 新生面摩擦試験法

### 2. 1 新生面摩擦試験機

新生面摩擦試験機は、切削加工時の工具すくい面における切屑と工具間の摩擦を再現できるように設計されている。本試験機では、切削加工時の工具すくい面の特徴である、①被削材の降伏応力をこえる面圧が負荷され、②局所的には被削材の融点に達するような温度場を再現でき、③被削材新生面と工具による新生面摩擦が可能である。

Fig.1 に新生面摩擦試験機の概要を示す。

新生面摩擦試験機は、被削材、切削工具、動力計、並行バネ、油圧シリンダ、ヒーターで構成される。切削工具を並行バネを介して動力計に固定し、旋盤の刃物台に設置した。工具の移動は工具後方にある油圧シリンダにより行った。並行バネにより上下方向の変位を拘束することで、水平方向のみの移動を可能とした。工具の移動手段に油圧シリンダを用いたのは、切削加工時の衝撃による水平方向の振動を油圧シリンダの減衰能により抑制するためである。また、切削工具の後方にカートリッジヒーターを設置することで、切削工具表面温度を最大 400 °C まで設定可能とした。切削工

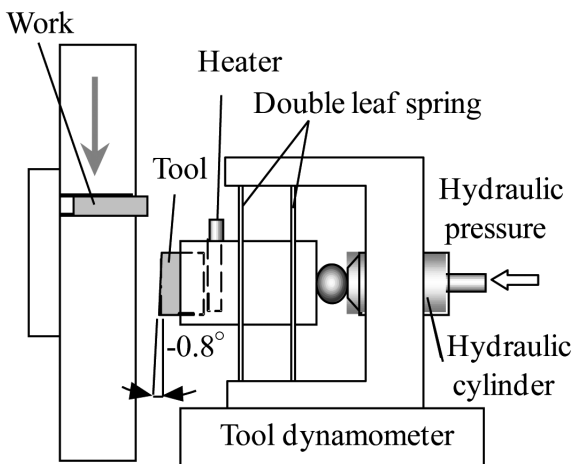


Fig.1. Newly-formed surface friction testing machine.

具表面温度は、切削工具の表層直下 1.5 mm の位置に設置した  $\phi$  1.0 シース型熱電対で測温することで、任意の温度に設定した。被削材試験片は旋盤チャックに治具を用いて固定した。本試験は、所定速度で回転している被削材試験片に、切削工具を水平方向に瞬時に移動させ、被削材試験片の先端を切削工具上を擦過させる。被削材試験片が切削工具上を擦過した直後に、被削材試験片の回転を速やかに停止しさせることで、1 回のみの擦過を可能とした。また、その際の加工力(垂直力、摩擦力)を動力計により測定した。

### 2. 2 被削材・切削工具試験片

本実験で使用した、被削材、切削工具の試験片形状を Fig.2 に示す。本実験で用いた被削材 Inconel 718 は高温においても降伏応力が非常に高いため、切削工具と接触する摩擦面を降伏させるには高い面圧を負荷する必要がある。そのため試験片先端の形状は、断面積を小さくし、かつ試験片の剛性を下げないために三角形状とした。切削工具には K 種超硬工具を平面研削にて Fig.2 に記述の寸法に仕上げた。切削加工時におけるすくい面の摩擦状態を再現するため、工具摩擦面には  $0.8^\circ$  の負の逃げ角を付与しており、面圧を付与しながらの摩擦を可能とした。表面粗さは一般的な切削工具と同程度とし、表面粗さ  $Ra=0.11 \mu m$  であった。また図中の  $\phi$  1 mm の穴は工具表面温度を制御する際のシース熱電対を設置するためのものである。

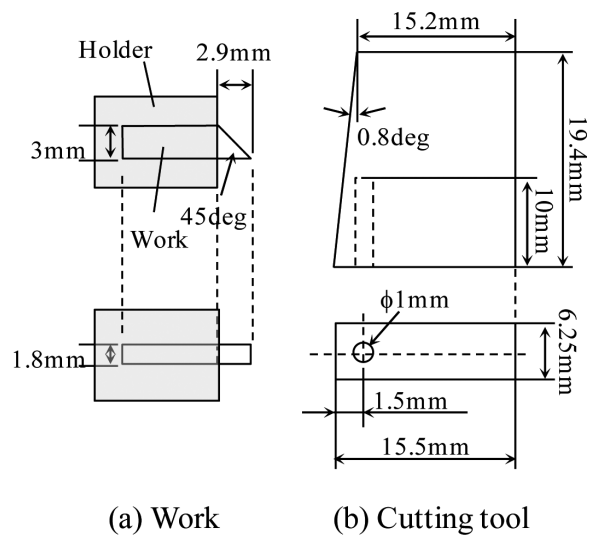


Fig.2. Dimension of test pieces.

### 2. 3 評価方法

Fig.3 に新生面摩擦試験中の加工の様子と、動力計で得られる加工力の測定例を示す。試験中の被削材の加工は3段階で行われる。(a) 被削材の先端部が工具の上端部に衝突すると切削加工が開始され、被削材に新生面が生成される。(b) 生成された被削材の新生面を、面圧を加えながら工具上を擦過させる。(c) 被削材が工具の下端部まで擦過すると、加工は完了となる。被削材が工具上を擦過する段階では、工具には負の逃げ角が付与されているため、被削材が工具の上を擦過していくにしたがって、垂直荷重が増加し、それに応じて摩擦力が増加していく。このときの、垂直方向と水平方向の力を動力計によって測定した。測定した荷重はそれぞれ、垂直荷重と摩擦力に変換し、垂直荷重と摩擦力の関係から摩擦係数を同定した。

## 3. 実験方法

### 3. 1 供試材

Inconel 718 は時効熱処理を行うことで強度が増す材料であり、切削加工においても時効熱処理材の加工が問題になることが多いため、本実験では時効熱処理材を対象とした。本実験で用いた Inconel 718 の化学組成を Table 1 に示す。素材は、熱間鍛造後に、Fig.4 に示す溶体化熱処理と時効熱処理を施し、HRC 43 ~ 45 に調質したのちに Fig.2(a) に示す被削材形状へと加工した。

Table 1. Chemical composition of Inconel 718 (mass%).

Ni	Mn	Si	Cr	Mo	Nb	Ti	Al	Fe
52.5	0.2	0.2	18.5	3.0	5.1	0.9	0.5	Bal.

### 3. 2 実験条件

摩擦面の温度が工具 - 被削材間の摩擦現象に及ぼす影響を調査するため、新生面摩擦試験機にて、工具温度、切削速度を変化させ実験を行った。Table 2 に実験条件を示す。切削速度は仕上げの高速加工を想定して 60 m/min とし、工具温度は 20 °C から 400 °C までで実施した。また、工具 - 被削材間の潤滑条件は無潤滑 (DRY) とした。摩擦状態の評価は、加工力 (垂直荷重、摩擦力) と、試験後の工具摩擦面の擦過痕で行い、加工中の被削材の変形挙動は高速度カメラを用いて観察した。

Table 2. Experimental conditions.

Work piece material	Inconel 718 (HRC 43-45)
Cutting tool material	WC
Cutting velocity	60 m/min
Roughness (cutting tool)	Ra=0.11 $\mu$ m
Cutting tool temperature	20, 200 and 400 °C

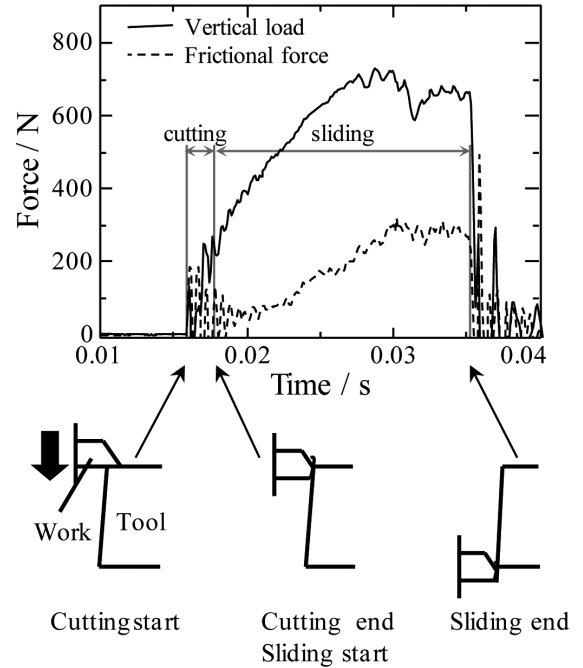
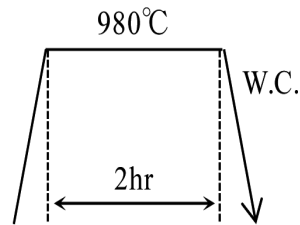


Fig. 3. Example of measurement waveform.

#### (a) Solution treatment



#### (b) Aging treatment

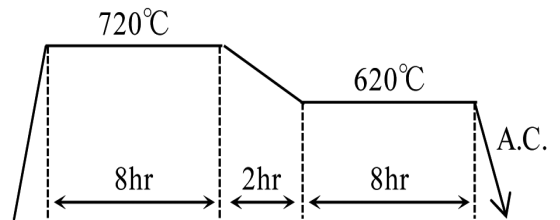


Fig.4. Heat treatment pattern.

## 4. 実験結果

### 4. 1 摩擦挙動の時間経過

Fig.5 に工具温度を変化させた際の、垂直荷重・摩擦力の時間変化、クーロン摩擦係数の時間変化、工具摩擦面の擦過痕を示す。クーロン摩擦係数 $\mu$ は、実験で得られた摩擦力 $F$ と垂直荷重 $N$ から次式より算出した。

$$\mu = F/N \dots\dots\dots(1)$$

垂直荷重は、時間の経過に伴い直線的に増加していく領域と、一定値となり変化しない領域が存在することが確認された。摩擦力においても同様の傾向が見られ、時間の経過に伴い直線的に増加していく領域と、急激に摩擦力が増加した後に一定値となり摩擦力が変化しない領域の存在が確認された。垂直荷重と摩擦力が時間経過に対して線形的に増加する領域ではクーロン摩擦係数はおよそ $\mu = 0.2$ の一定値を示し、垂直荷重と摩擦力が時間経過に対して一定値を示す領域では、クーロン摩擦係数は急激に増加したのち、 $\mu = 0.4 \sim 0.6$  近

傍で一定値となった。また、工具摩擦面の擦過痕は時間経過とともに変化する、加工の前半では被削材の工具への凝着は見られず、加工の後半では明らかな凝着痕が確認できた。また、凝着が開始する時点と、垂直荷重・摩擦力・摩擦係数の挙動が遷移する時点が一致することが確認された。

### 4. 2 工具温度の影響

工具温度を 20℃、200℃、400℃と上昇させることで、垂直荷重・摩擦力・摩擦係数が遷移するまでの時間が短くなるのが観察された。摩擦状態が遷移するまでの時間が短くなるのとは一致して、被削材の工具摩擦面への凝着も短時間で生じている。摩擦状態が遷移したのちは、摩擦力は垂直荷重によらず 250 ~ 300 N ほど一定となった。

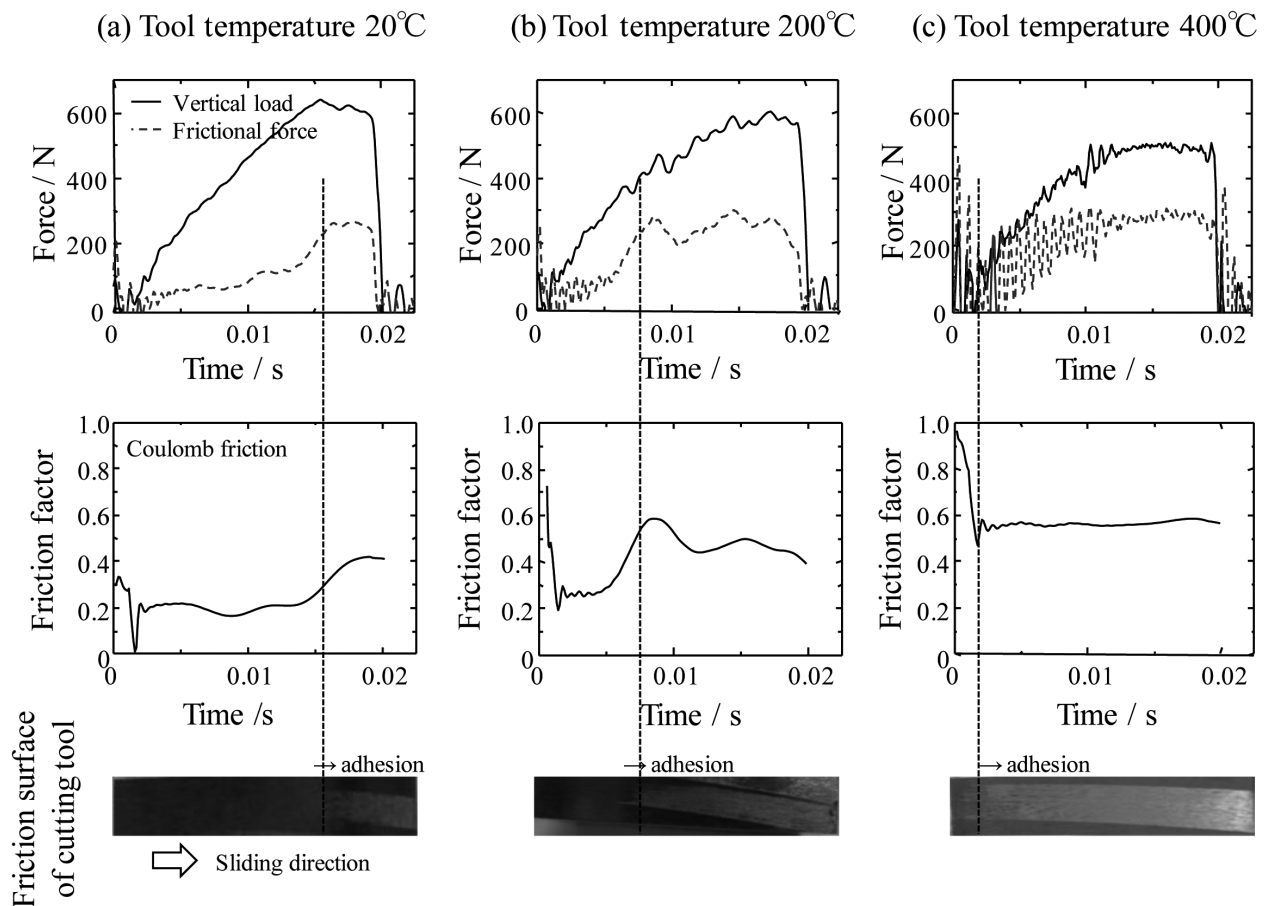
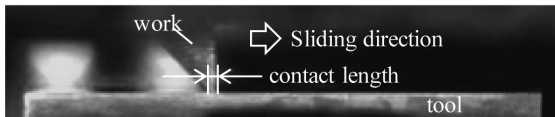


Fig.5. Results of newly-formed surface friction test.

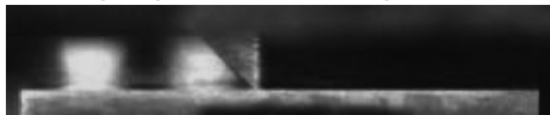
### 4. 3 加工中のワーク変形挙動

摩擦現象に影響を与えるパラメータとして温度の他には、その面に作用する応力が考えられる。試験中の応力変化を調べるには摩擦面の接触面積を測定する必要がある。本実験では高速度カメラにより加工中の被削材摩擦面の接触長さの変化を観察した。Fig.6 に加工中の被削材先端部の変形挙動と垂直荷重・摩擦力の時間変化、および加工後の工具摩擦面写真を示す。加工開始から摩擦距離 9 mm の位置までは、被削材の接触長さは 0.39 mm のままで増加しないが、摩擦距離が 13 mm をこえると接触長さが急激に増加していることが確認された。また垂直荷重の変化に着目すると、摩擦距離が 13 mm に達するまでは垂直荷重はほぼ直線的に増加し続け、摩擦距離が 13 mm をこえると垂直荷重はほぼ一定値となっている。これらの結果から、摩擦距離 13 mm に達すると、被削材の摩擦面の全領域が全降伏状態に達することで塑性変形が生じ、垂直荷重の増加が抑制されたと考えられる。また、摩擦面が全降伏状態に達することで接触長さが増加する、いわゆる junction-growth が生じたと考えられる。さらに、工具摩擦面上の凝着痕を見ると、摩擦面が全降伏に達したと考えられる摩擦距離から、被削材接触範囲全面に凝着痕が確認でき、凝着の開始、すなわち摩擦形態の遷移が摩擦面の全降伏によって生じると考えられる。

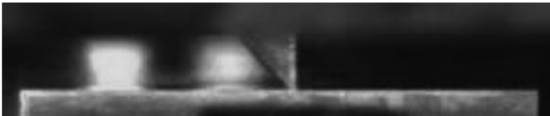
(1) Sliding length 6mm , contact length 0.39mm



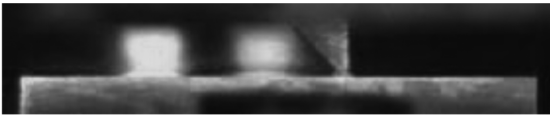
(2) Sliding length 8mm , contact length 0.39mm



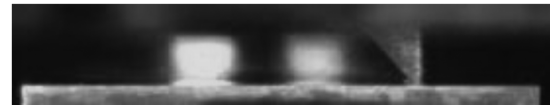
(3) Sliding length 9mm , contact length 0.39mm



(4) Sliding length 13mm , contact length 0.60mm



(5) Sliding length 16mm , contact length 0.67mm



(a) Change of contact length during friction testing

## 5. 考 察

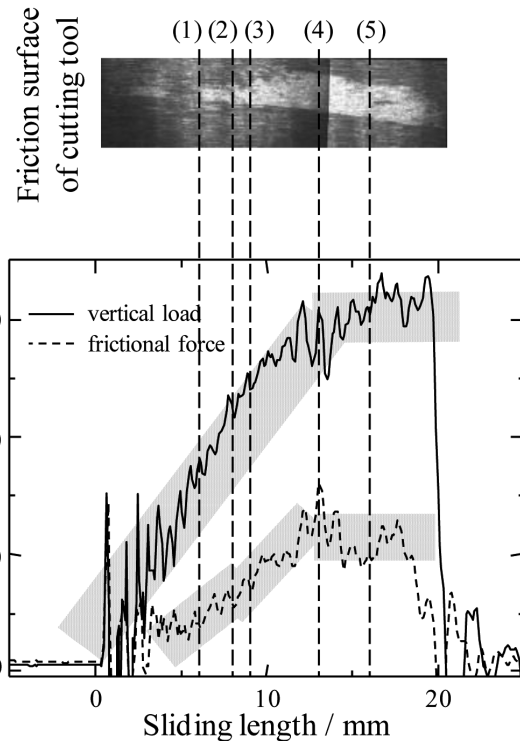
以上の実験結果から、被削材 - 工具間の摩擦状態は、凝着が生じるまではクーロン摩擦状態であり、垂直荷重の増加に応じて摩擦力も線形的に増加していくことが分かった。一方、摩擦面が全降伏に達すると工具への凝着が生じ、摩擦形態がせん断摩擦状態へ遷移することが分かった。また、工具温度を上昇させることで、凝着が生じるまでの摩擦距離が短くなっていることから、摩擦面が短時間で全降伏に至る条件に達している、つまり、全降伏に至る応力状態と温度状態に達していると考えられる。

### 5. 1 降伏比の定義

被削材の摩擦面が全降伏に達するか否かを判定する指標として、摩擦面の相当応力と降伏応力の比をとり、降伏比 (yielding ratio) と定義した。

$$\text{降伏比} = \sigma_{eq} / Y \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\sigma_{eq}$  は相当応力、Y は被削材の降伏応力である。降伏比が 1 未満では相当応力は被削材降伏応力よりも小さいため、被削材の摩擦面の全降伏は生じない。降伏比が 1 に達すると相当応力が降伏比と同じになり、摩擦面で全降伏が生じる。相当応力は次式で表わされる。



(b) Time change of load during friction testing

Fig.6. Deformation behavior of work during friction testing (tool temperature 200 °C).

$$\sigma_{eq} = (\sigma^2 + 4\tau^2)^{0.5} \dots\dots\dots(3)$$

$$\sigma = N'/A = N * \cos \theta \dots\dots\dots(4)$$

$$\tau = F/A = (\tau_k * A_{real})/A = (\tau_k * N'/Y)/A \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 $\sigma_{eq}$ は相当応力、 $\sigma$ は垂直応力、 $\tau$ は摩擦応力、 $N'$ は摩擦面法線方向の垂直力、 $N$ は動力計で測定した垂直荷重、 $\theta$ は工具すくい角、 $A_{real}$ は被削材と工具すくい面との真実接触面積、 $A$ は被削材の摩擦面断面積、 $\tau_k$ は被削材の降伏せん断応力である。これらの式より、加工中の荷重と被削材摩擦面の断面積を測定することで、加工中の任意の位置での相当応力を求めることができる。

### 5. 2 摩擦面温度の推定

被削材の降伏応力は温度によって変化するため、加工中の被削材の摩擦面温度を求める必要がある。加工中の摩擦面温度は、Fig.7に示す伝熱モデルを仮定し、M.C.Shawのモデル<sup>9)</sup>により摩擦面温度を推定した。摩擦面に生じる熱流束は凝着部のせん断のみで生じ、熱流束の分布は摩擦面をとおして均一と仮定すると、摩擦面の熱流束 $q$ は次式で表わされる。

$$q = (\tau_k * A_{real}) * V/A = (\tau_k * N' / Y) * V/A \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $V$ は摩擦速度である。また、摩擦面で発生した熱流束は、工具と被削材にそれぞれ $R$ 、 $(1-R)$ の割合で流入すると仮定すると、摩擦面の温度上昇 $\Delta t$ は式(8)から算出できる。

$$R = 1 / (1 + 0.754 * (k_2/k_1) / (A * \sqrt{L})) \dots\dots\dots(7)$$

$$\Delta t = 0.754 * R * q * l_h / k_1 * \sqrt{L} \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 $R$ は熱分配係数、 $k_1$ は工具の熱伝導率、 $k_2$ は被削材の熱伝導率、 $l_h$ は接触長さの半分、 $L$ は被削材のペクレ数である。

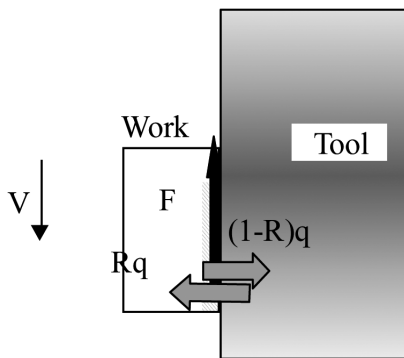


Fig.7. Heat transfer model of friction test.

### 5. 3 降伏比による摩擦現象の整理

上記モデルで加工中の摩擦面温度の変化を推定し、摩擦面温度から、その際の被削材の降伏応力を特定した。得られた被削材の降伏応力を用いて、加工中の降伏比の算出を行った。Fig.8～10に工具温度20℃、200℃、400℃の際の、降伏比、垂直荷重、摩擦力の時間変化、および工具摩擦面の写真を示す。凝着が生じるまでは、垂直荷重、摩擦力、降伏比ともには直線的に増加し、降伏比がほぼ1に達するところで、摩擦力が急激に増加し、凝着が生じていることが分かった。このことから、摩擦状態の遷移は、被削材の摩擦面が全降伏することで生じクーロン摩擦状態からせん断摩擦状態に遷移し、同時に凝着も生じ始めることが確認できた。工具温度を上昇させた際の摩擦状態の遷移が早まる現象も、摩擦面初期温度を高くすることで、摩擦面温度が短時間で上昇し、被削材の降伏応力が急激に低下するため、早期に降伏条件に達するために生じると考えられる。

以上のことから、被削材と工具間の新生面接触下における摩擦現象は、摩擦面温度を考慮した降伏比で整理できることが示唆された。降伏比は温度、相当応力、被削材の降伏応力から簡便に算出できる値であり、有限要素解析を用いることで、エンドミル加工やフライス加工のような断続加工において、凝着を抑制するための切削条件の検討に活用できると考えられる。

## 6. 結 論

本研究では、Inconel 718 切削加工時における被削材－工具間の摩擦現象を明らかにするため、新生面摩擦試験を行い、摩擦挙動の変化と、摩擦挙動に及ぼす摩擦面温度の影響を調査し、以下の結果を得た。

- (1) 被削材が工具へ凝着するまでは、摩擦力と垂直荷重とは比例するためクーロン摩擦であるが、凝着が生じたのちは、被削材のせん断強度に比例するせん断摩擦へと遷移した。
- (2) 工具の初期温度を20℃から400℃へ上昇させることで、被削材の工具への凝着が短い擦過距離で生じた。
- (3) 工具への凝着は、被削材の摩擦面が全降伏に達することで生じると考えられ、凝着が生じるか否かの判断指標として、摩擦面温度を考慮した降伏比が有効

であることを確認した。

(文 献)

- 1) 木村幸, 加治木紳哉: 電力中央研究所報告, Y07009 (2008), 2.
- 2) T.H.C.Childs: Wear, 260 (2006), 310.
- 3) 生田明彦: 溶接学会全国大会講演概要, 67 (2000), 44.
- 4) 生田明彦: 溶接学会全国大会講演概要, 75 (2004), 234.
- 5) 山本雄二, 兼田楨宏: トライボロジー, 理工学社, (1998), 41.
- 6) 竹山英彦: 機械の研究, 51 (1999), 894.
- 7) 糸魚川文宏: 精密工学会春期大会講演論文集, (2006), 311.
- 8) 中村隆: 電気製鋼, 78 (2007), 241.
- 9) M.C.SHAW: Metal Cutting Principle.

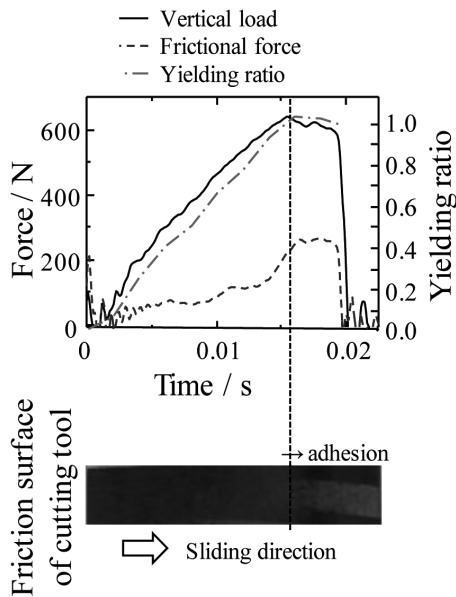


Fig.8. Changing of yielding ratio(tool temperature 20 °C).

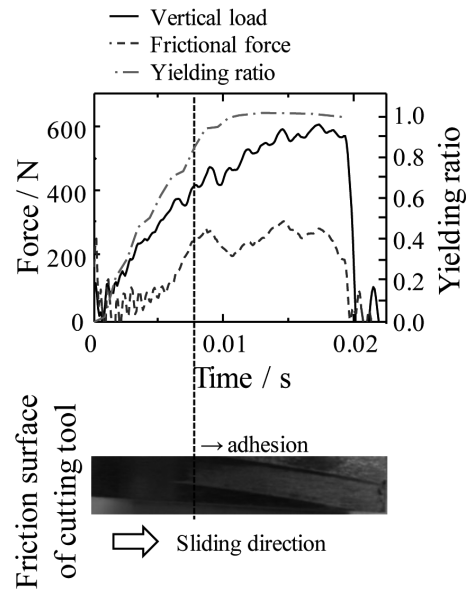


Fig.9. Changing of yielding ratio(tool temperature 200 °C).

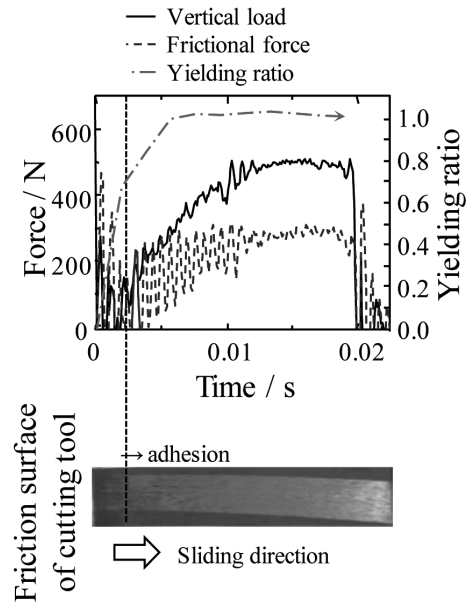


Fig.10. Changing of yielding ratio(tool temperature 400 °C).