

高速切削時における切削熱の挙動に関する研究*

平尾政利** 寺島淳雄*** 朱 浩允† 白瀬敬一†† 安井武司**

Behavior of Cutting Heat in High Speed Cutting

Masatoshi HIRAO, Atsuo TERASHIMA, Ho Youn JOO, Keiichi SHIRASE and Takeshi YASUI

Many researches about cutting temperature have been reported, because of the great influence of a tool face temperature on a tool wear. However, there is few report about cutting heat. The cutting conditions (cutting speed, feed, etc.) and accuracy of temperature measurement in recent cutting are quite different from those in the past. In case of cutting a material like aluminum, for instance, the cutting speed is usually adopted as 1000m/min much higher than that in the past. The behavior of cutting heat (heat into chip, work and tool) in high speed cutting has been investigated applying theory and experiment methods in the present study. The heat generated in the cutting process is distributed to three parts such as main shear plane, rake face and clearance face. In this experiment, the work materials are AISI 1045 steeland Aluminum alloy A5052, and each cutting speed is up to 400m/min and 850m/min. The cutting heat are measured by accurate thermometers at different depths of cut and flank contact lengths. In addition, the heat ratio of chip, work and tool is calculated from theory. Experimental data are similar to theoretical results. Results of this research show that higher the cutting speed, higher the percentage of heat into the chip and lower the percentage of heat in the tool and work.

Key words: high speed cutting, cutting heat, cutting temperature, chip, tool, work

1. はじめに

切削工具面の温度に関する研究は古くから行われており、報告¹⁾²⁾も多い。これは工具面温度が工具摩耗に大きく影響するためである。しかし切削中に発生する熱量に関してはほとんど報告はなく、50年前に簡単な報告があるのみである。この報告では実験そのものが非常に古く、切削速度など実験条件が今日とはかなりかけ離れている。

今日の高速切削では、1000m/min以上の切削速度が採用されている。このような高速切削では工具摩耗が異常に進行し、切削不能になることが予想される。しかし現実にはこのような高速切削が可能になっている大きな理由として、コーティッド切削工具の進歩によるものとしている。

ところで、一般の連続切りくずを生成するような延性金属の切削において、消費されるエネルギーの大部分は次の3つに使われ、これらのほとんどが熱に変換される。

- (1)せん断面で切りくずがつくられる際のせん断仕事
- (2)工具すくい面と切りくずの間の摩擦仕事および、それによる切りくず内部での塑性変形
- (3)工具逃げ面と仕上げ面の間の摩擦仕事および、それによる仕上げ面表層の塑性変形

上記のように、切れ刃先端で発生した膨大な熱は工具や被削材、切屑に流入して、それぞれの温度を上昇させる。切削熱の大部分は、高速切削になるにつれて、従来いわれている以上にこの発生した熱の大部分が切屑に移動している傾向にあると考えられる。そこで、本研究では、高速切削時に発生する熱量の挙動、すなわち切屑へ移動する熱量、工具へ移動する熱量、被削材へ移動する熱量を理論的、実験的に明らかにすることを目的とする。

2. 切削温度の熱的解析³⁾

連続切屑を生成するような普通の延性金属の切削では消費されるエネルギーの大部分は図1のように、せん断面で切屑が作られる際の塑性変形、工具すくい角と切り屑との間の摩擦、工具逃げ面と被削材表面との間の摩擦と3つに使われ、これらほとんどが熱に変換される。ここでは、これらの熱源で発生した熱量が切屑、被削材、工具へ流入する割合 R_1 , R_2 , R_3 を求める。

(A)せん断面の平均温度 $\bar{\theta}_s$

せん断面で単位時間、単位面積当たりに発生する熱量を q_1 とし、いま切屑に流入する熱量を $R_1 q_1$ とすると被削材に流入する熱量は $(1-R_1)q_1$ となる。

$R_1 q_1$ の加熱のためにせん断面の平均温度 $\bar{\theta}_s$ は次のように表される。

$$\bar{\theta}_s = \frac{R_1 q_1}{\rho_s c_s} \left(\frac{t \cdot b}{\sin \phi} \right) \left(\frac{1}{v \cdot t \cdot b} \right) + \theta_0 \quad (1)$$

θ_0 : 周辺温度, c_s, ρ_s : $\bar{\theta}_s$ の平均温度の対する切りくず(被削材)の比熱および比重, v : 切削速度, b : 切削幅, t : 切込み, ϕ : せん断角

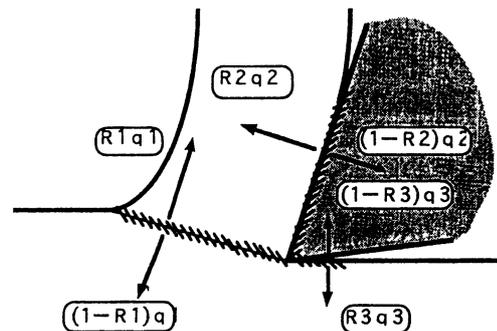


Fig.1 Generated heat in cutting

* 原稿受付 平成10年1月9日
 ** 正会員 金沢大学工学部 (金沢市小立野 2-40-20)
 *** 金沢大学大学院工学研究科
 † 韓国国立天安工業専門大学 (257-1 BUDAE DONG CHON-AN SI)
 †† 正会員 大阪大学工学部 (吹田市山田丘 2-1)

次に $(1-R_1)q_1$ なる熱源による被削材の温度上昇からせん断面の平均温度を求め、この2つの方法で求めたせん断面温度上昇が等しいという条件から R_1 を求める。

J.C. Jeager の解析より単位時間、単位面積当たりの発熱量が $(1-R_1)q_1$ なる矩形熱源がせん断方向に V_s なる速度で移動する場合、せん断面の平均温度 $\bar{\theta}_s$ は次のように表される。

$$\bar{\theta}_s = 0.754 \frac{(1-R_1)q_1 \left(\frac{t}{2 \sin \phi} \right)}{k_1 \sqrt{L_1}} + \theta_0 \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{v_s \left(\frac{t}{2 \sin \phi} \right)}{2K_1} = \frac{v \cdot \gamma \cdot t}{4K_1} ; K_1 = \frac{k_1}{\rho_1 c_1}$$

ただし k_1 は温度 $\bar{\theta}_s$ における被削材の熱伝導率、 γ は切削のせん断ひずみである。よって、式(1)、(2)を等しいとおいて R_1 を求めることができる。

$$R_1 = \frac{1}{1 + \frac{0.664 \gamma}{\sqrt{L_1}}}$$

(B) すくい面の摩擦による上昇温度 $\Delta \bar{\theta}_f$

すくい面では単位時間、単位面積当たりに発生する熱量を q_2 とし、 $R_2 q_2$ が切り屑に入り、残りの $(1-R_2)q_2$ は工具に入るものとして考える。

切り屑の工具に接する面の摩擦による平均上昇温度 $\Delta \bar{\theta}_f$ は

$$\Delta \bar{\theta}_f = \frac{0.754(R_2 q_2) a}{2k_2 \sqrt{L_2}}$$

$$L_2 = \frac{v_c \cdot a}{4K_2}$$

ただし a は切り屑と工具の接触長さ、 k_2 、 K_2 は最終温度における切り屑の熱伝導率および温度伝達率

切り屑の工具に接する面の平均温度 $\bar{\theta}_i$ はせん断面の平均温度上昇 $\bar{\theta}_s$ と摩擦による平均温度上昇 $\Delta \bar{\theta}_f$ を加えたものであるから、

$$\bar{\theta}_i = \bar{\theta}_s + \Delta \bar{\theta}_f = \bar{\theta}_s + \frac{0.377(R_2 q_2) a}{k_2 \sqrt{L_2}} \quad (3)$$

また工具側からみたすくい面の平均温度 $\bar{\theta}_t$ は熱伝導論より、

$$\bar{\theta}_t = \frac{(1-R_2)q_2 a}{k_3} \bar{A} + \theta_0 \quad (4)$$

ただし k_3 は温度 $\bar{\theta}_t$ における工具の熱伝導率、 \bar{A} は面積係数という。そして、式(3)と式(4)を等しいとおくと R_2 は次式のとおりでである。

$$R_2 = \frac{q_2 \frac{a \cdot \bar{A}}{k_3} - (\bar{\theta}_s - \theta_0)}{q_2 \frac{a \cdot \bar{A}}{k_3} + q_2 \frac{0.377 a}{k_2 \sqrt{L_2}}}$$

(C) 逃げ面の摩擦による上昇温度 $\bar{\theta}_w$

逃げ面においては、単位時間、単位面積当たりに発生する熱量を q_3 とし、 $R_3 q_3$ が工具に入り、残りの $(1-R_3)q_3$ は被削材に入るものとして考える。被削材の工具に接する面の摩擦による上昇温度 $\bar{\theta}_w$ については、原理的に(B)に述べた切削温度の計算方法と全く同様であるので重複を避ける。

(D) 各部への流入割合について

ここでせん断面積、すくい面、逃げ面における接触面積を A_1 、 A_2 、 A_3 とし、 Q は実験より得られる単位時間当たりの発熱量で次式のように示される。

$$Q = q_1 A_1 + q_2 A_2 + q_3 A_3 \quad (5)$$

よって、切り屑へ流入する熱量 $Q_c(W)$ 、被削材へ流入する熱量 $Q_w(W)$ 、工具へ流入する熱量 $Q_t(W)$ は次式より得られる。

$$Q_c = R_1 q_1 A_1 + R_2 q_2 A_2$$

$$Q_w = (1-R_1)q_1 A_1 + R_3 q_3 A_3 \quad (6)$$

$$Q_t = (1-R_2)q_2 A_2 + (1-R_3)q_3 A_3$$

それぞれを Q で割ると、切屑、被削材、工具への切削熱の流入割合 $R_c(\%)$ 、 $R_w(\%)$ 、 $R_t(\%)$ は、次のようになる。

$$R_c = \frac{Q_c}{Q} \times 100$$

$$R_w = \frac{Q_w}{Q} \times 100$$

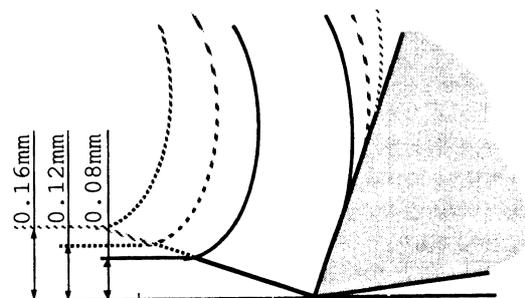
$$R_t = \frac{Q_t}{Q} \times 100$$

3. 実験方法

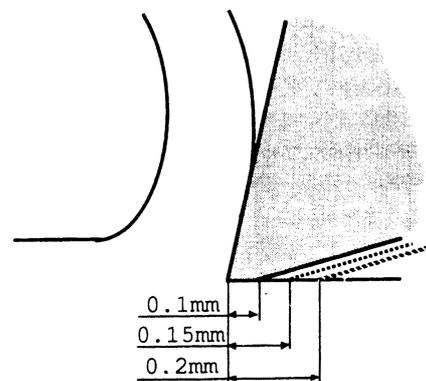
3.1 実験の原理

図2のように切込みの変化と逃げ面接触長さを制限させるチップを用いて切削する。切込みを変化させることにより、せん断面、すくい面接触面における単位時間、単位面積当たりの発熱量を、逃げ面接触長さを制限させるチップを用いることにより逃げ面接触面における単位時間、単位面積当たりの発熱量を求めることができる。各熱源における発熱量を求めることができれば、2章で述べた切削理論より、切屑、工具、被削材への流入割合を導くことができる。

なおここで、切込み変化で使用されるチップは逃げ面の加工がされていないチップ（以降ニューチップと呼ぶ）であり、逃げ面を加工されたチップによる実験は送り速度を一定とする。



(a) Depth of cut $\zeta \Pi$



(b) Flank contact length

Fig2 Variation in contact length

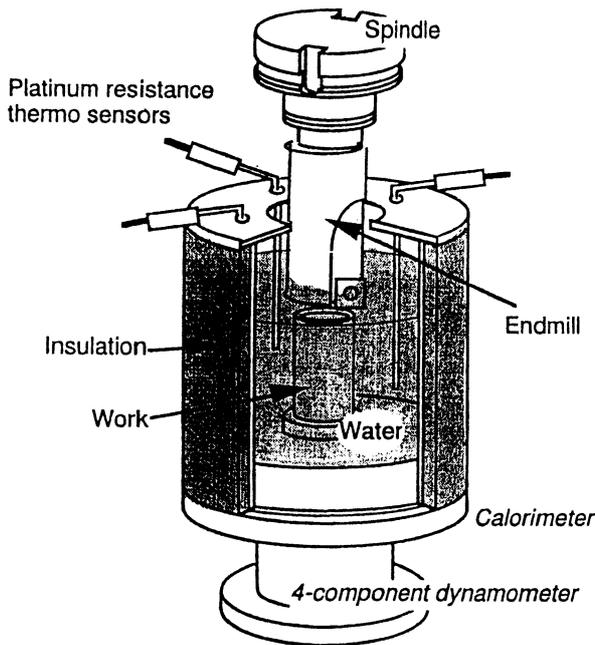


Fig.3 Experimental apparatus

3.2 実験装置

図3に本実験で使用した実験装置の概略を示す。断熱材を巻いた熱量計に1ℓの水を入れ、切削中に発生した切削熱を水に吸収させる。そして、その間の上昇温度から総発熱量を求める。また、温度センサを切屑から守るために、防護ネットを取り付けた。被削材にはS45C, Aluminum (5052) の2種類を用い、それぞれ外径32, 34mm, 内径30mmのパイプ状(切削幅は1mm, 2mmである)に仕上げたものである。使用した工作機械はS45Cの実験では汎用数値制御ボール盤(碌々産業製:RND-1003形), Aluminumを用いた実験ではマシニングセンタ(松浦機械製作所製:FX-1)である。これをエンドミル(東芝タンガロイ製:TCB-390)とスローアウェイチップ(同社製:超硬, すくい角5°, 逃げ角6°)1枚刃で切削を行う。水の上昇温度は、位置と深さを変えた4本の温度センサで水温を測定し、その平均上昇温度を用いる。温度センサは、白金測温抵抗体であり、熱電対などに比較して精度が高く、1/1000°Cの分解能を持つ。温度校正は4本の白金測温抵抗体をそれぞれ3種類の沸点の異なる液体(蒸留水(100°C), アセトン(56.3°C), エタノール(78.3°C))と蒸留水の融点(0°C)の合計4点で行った。

また、切削と同時に切削抵抗としてスラスト, トルクをKistler動力計(type 9272)で測定することにより切削理論からも発熱量を算出し、実際の温度上昇との比較を行った。

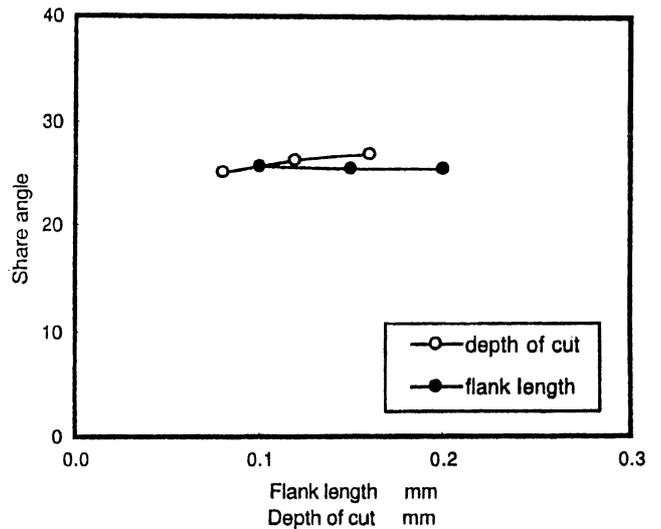


Fig.4 Relation between each length and shear angle (Cutting speed : 214m/min)

4. データ整理に必要な事項

4.1 熱量計の熱容量について

熱量計のうち、水と接する実験器具については、その接し方によって水に相当する熱容量(水当量)として考慮した。実験器具の水当量を表1に示す。番号2-4は浸水部分の水当量, 番号6は水没部分の水当量, 物性値は室温(20°C)の値である。

これはS45Cを用いた実験における熱容量であるが, Aluminumについても同様に考慮している。

熱容量が1/1000オーダのものを無視すると、熱量計の熱容量Mは次の値を持つ。

$$\begin{aligned}
 M &= \text{水の熱容量} + \text{熱量計の水当量} \\
 &= 4.175 + 0.706 \\
 &= 4.881\text{kJ/K}
 \end{aligned}$$

4.2 切削理論との比較⁴⁾

切削中の上昇温度 ΔT (°C), 切削時間 τ (s)および熱量計の熱容量M(J/kg·K)から、この間の総発熱量Q(W)は、

$$Q = \frac{M \cdot \Delta T}{\tau} \tag{7}$$

と表される。

また、切削理論からせん断面およびすくい面で発生する熱量 q_1, q_2 を計算する場合、主分力は M_z/r に、送り分力はスラスト F_z に相当する。ここで、 M_z はトルク(N·m), r は被削材の半径(m)である。

Table 1 Water equivalent of the calorimeter (S45C)

	Materials	Density kg/m ³	Volume m ³	Mass kg	Specific heat kJ/kg·K	Heat capacity kJ/K
1	Water	-	1.0×10 ⁻³	0.998	4.183	4.175
2	Endmill	SCM440	-	0.423	0.477	0.202
3	Sensors	SUS316	0.180×10 ⁻⁵	0.014	0.502	0.007
4	Container	SUS304	9.08×10 ⁻⁵	0.784	0.499	0.391
5	Work	S45C	-	0.25	0.479	0.12
6	Tool tip	P20	-	0.007	0.251	0.002

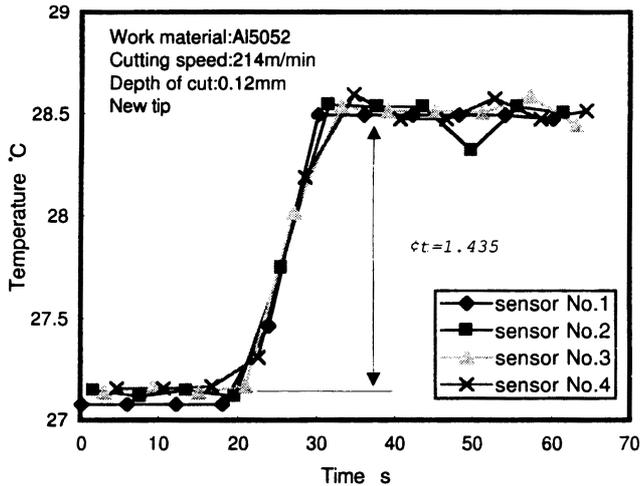


Fig.5 Temperature of 4 sensors

5. 実験結果

5.1 切削機構

各接触面を変化させるに当たって切削機構が同一でなければ比較できない。すなわち、せん断角が一定でなければならない。切削後の切屑厚さよりせん断角を算出した結果を図4に示す。

逃げ面接触長を変化させた実験においては25.5°で一定であり、また切込みの変化では最大で2°の違いとなり、ほぼ同一の切削機構を持つといえる。よって、切込みおよび逃げ面接触長を変化させることで発熱量を求めることができる。

5.2 温度上昇測定

図5は、切削速度214m/min、送り速度0.12mm/revにおけるニューチップを用い、被削材としてアルミニウムを切削した際の温度上昇を測定した結果である。切削終了後は、主軸による攪拌がなくなるためにばらつきがみられるが、温度の上昇するときの傾きは、4本のセンサとも、ほぼ一致している。

この条件において、4本のセンサの上昇温度を平均すると1.435°Cになり、これを切削上昇温度とする。また、切削中は、工具の回転と送りによる攪拌によって水温は均一になるが、わずかながら水温は上昇する(0.073°C)。このことを考慮した結果、切削のみにおける上昇温度は切削上昇温度と攪拌上昇温度との差となり、この条件では1.362°Cであった。よってこの条件における総発熱量は661.5Wとなる。

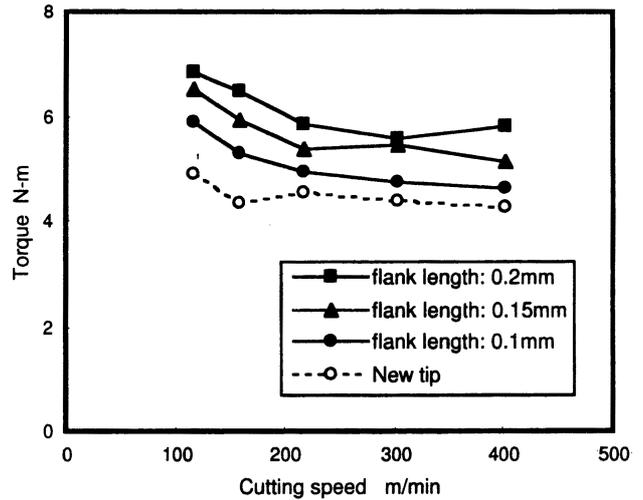


Fig.6 Relation between torque and cutting speed (S45C)

5.3 切削抵抗

図6に切削速度に対するトルクの変化を、ニューチップおよび逃げ面を加工したチップごとに表したものである。切削速度の上昇とともにトルクの値が減少している。同様にスラストについても傾向を示した。また、切込みの変化においてもこれと同様の傾向であった。

5.4 各熱源における発熱量

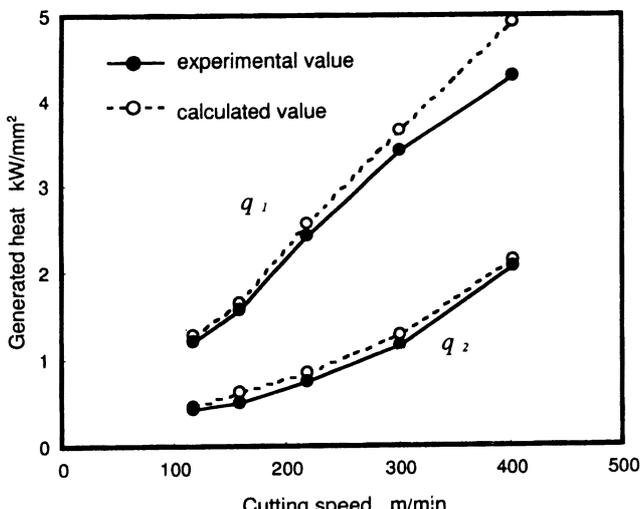
図7は各接触面、すなわちせん断面、すくい面における単位時間、単位面積における発熱量 q_1 、 q_2 のグラフである。なお、逃げ面における発熱量 q_3 については、ここでは省略した。

理論値と実験値ではほぼ同じ傾向を示している。また、中・低速域においてせん断面、すくい面の発熱量はせん断面の方が切削速度に対する増分が大きかった。しかし、高速切削域においてそれらの傾向はみられず、逆にすくい面の方が切削速度に対して増分が大きいようである。

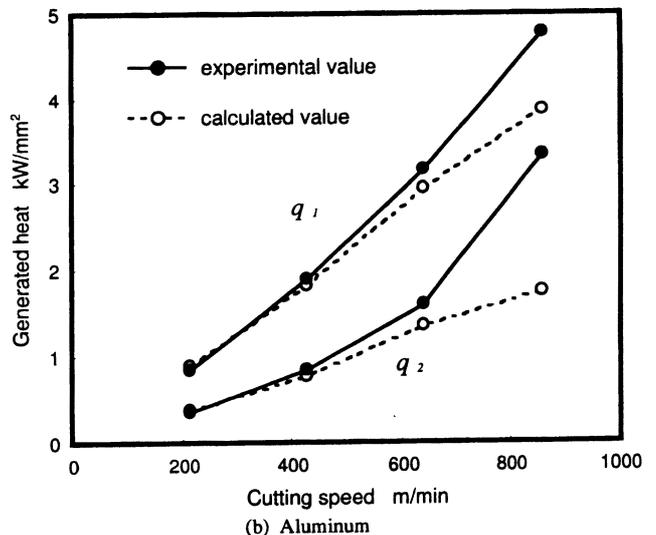
5.5 各部への流入熱量

図8は各部へ流入する熱量を示したものである。前節で得られた各熱源における発熱量を2章で述べた熱的解析を用いて発熱量の分配を算出し、式(6)より切屑・工具・被削材へ流入する熱量を求めた。

ほぼ理論値と実験値が一致しているが、切削速度の増加とともに理論値と実験値が逆転している部分もみられる。これは、切削理論では逃げ面の発熱をないものとしているが、実際は高速になるにつれ、逃げ面での接触による被削材表面との摩擦が大きくなり、そこで発生熱量も大きくなるためだと考えられる。



(a) S45C



(b) Aluminum

Fig.7 Generated heat on shear and crater

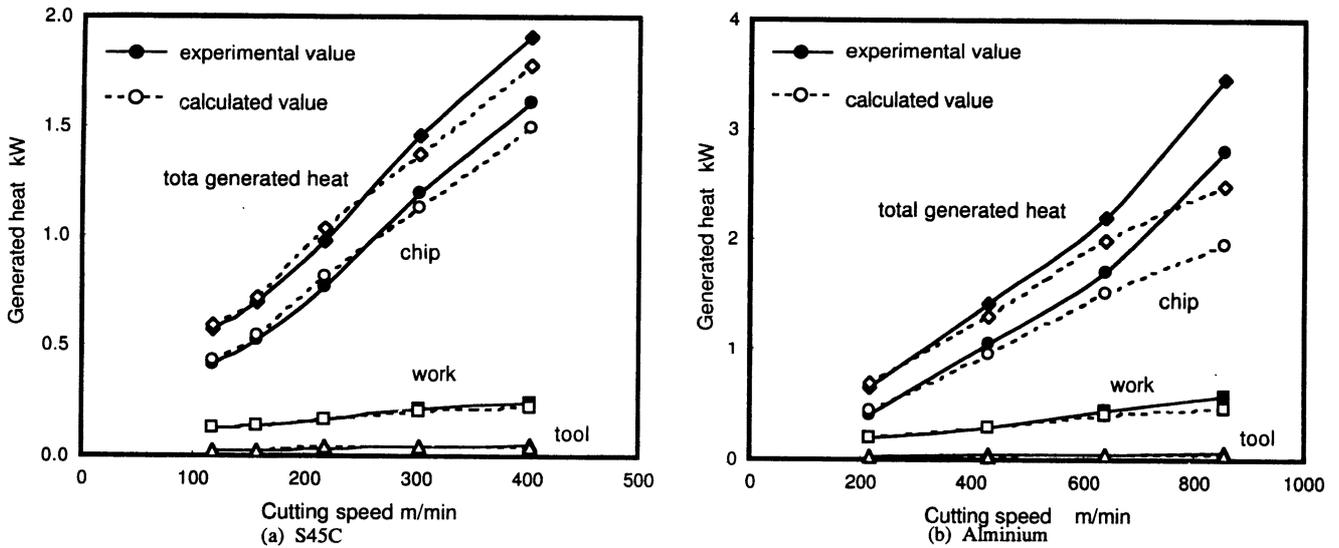


Fig.8 Generating heat of inflow to each part

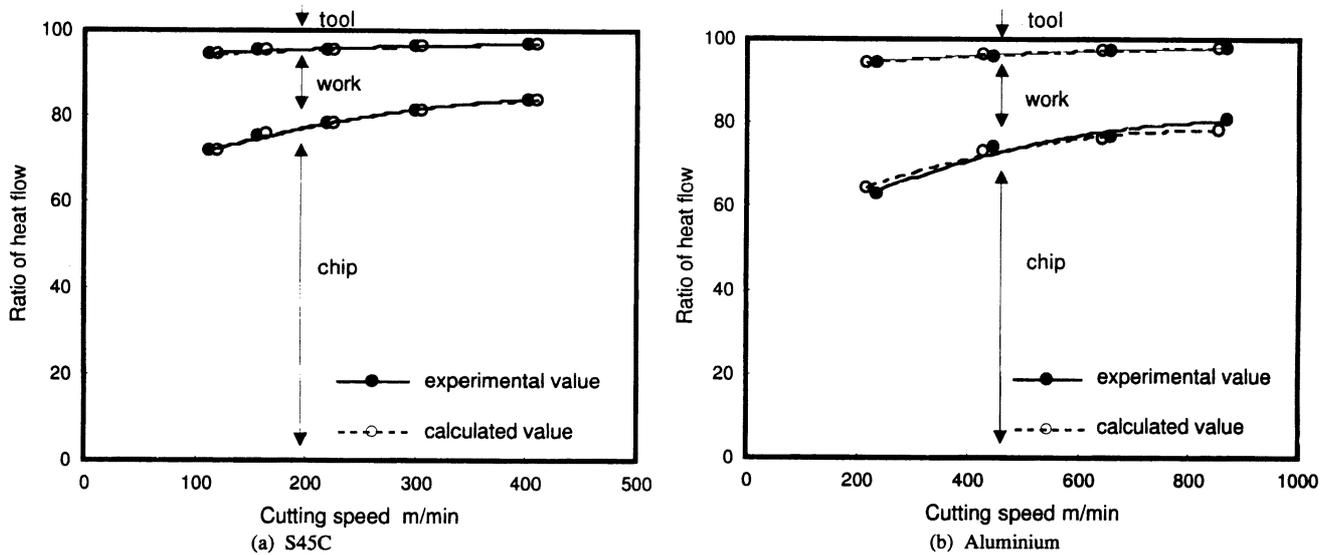


Fig.9 Ratio of heat flow

しかし、熱量の流入する傾向としては、従来言われているように、切屑への流入がほとんどであった。また、被削材に残存する熱量の増分はわずかであり、工具には、切削速度の増加にかかわらずほぼ一定の値を示した。

5.6 流入熱量割合

図9に切削熱の流入割合を示す。各部への流入割合は、被削材と工具の熱伝導率、切削条件などによって変わるが、それぞれの被削材に対する理論値と実験値は差があまりみられず、よく一致している。このことから、この実験装置を使用しての切削熱流入割合を求めることは妥当であると言える。

流入割合の傾向としては、従来言われているとおり、切削速度の上昇とともに切屑への熱量流入割合は増加し、反対に被削材・工具への流入割合は減少している。

6. ま と め

- (1) 切込みや逃げ面接触長さを変化させることにより、切屑、被削材、工具への切削熱の流入割合を求めることができた。
- (2) 切削熱の切屑への流入割合は、切削速度の上昇とともに増加し、被削材、工具へは減少していく。
- (3) 高速切削になるにつれて、逃げ面での摩擦による発熱は無視できなくなる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、実験用チップの製作をしていただいた東芝タンガロイ(株)の関係各位、ならびに快適な実験環境を提供をして頂いた石川県工業試験場の広崎憲一氏に深く謝意を表します。

また、実験に協力いただいた金沢大学4年の三尾俊介氏、ならびに、多大に有益なご助言を頂いた金沢大学の浅野久志技官、儘田知憲氏(現日立建機(株))に深く感謝の意を表します。

なお本研究の一部は、(財)スズキ財団より助成を受けて行われたことを付記し、感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) A.O.Schmidt & J.R Roubik: Distribution of Heat Generated in Drilling, Trans. ASME, 71(1949)
- 2) A.O.Schmidt et al, A Thermal-Balance Method and Mechanical Investigation for Evaluating Machinability, Trans. ASME, 67, 4(1945) 225.
- 3) E.G.Loewen & M.C Shaw: On the Analysis of Cutting Tool Temperature, Trans. ASME(1954-2)
- 4) A.O.Schmidt, W.W.Gilbert and O.W.Boston : A Thermal-Balance Method and Mechanical Investigation Machinability, Trans. ASME, 67,(1945)