アルミニウムと他の金属との切削温度の比較*

アルミニウム合金の切削温度について (第1報)

栗原 健助** 菊地 庄作** 江田 弘**

Cutting temperature of aluminum and other metals
Studies on cutting temperature of aluminum alloys (1st Report)
UDC 669.715 : 621.9.011 : 536.5.55

KURIHARA Kensuke** · KIKUCHI Shosaku** · EDA Hiroshi**

For the purpose of investigating variation in cutting temperature between workpiece and tool during approximately orthogonal cutting, following experiments were conducted by tool-workpiece thermocouple method using cutting dynamometer for measuring cutting temperature and cutting force, simultaneously.

Cutting tests were carried out on 4 sorts of pure metals; i.e., aluminum (99.5% purity), copper (99.6%), magnesium (99.9%), and 0.25% carbon steel.

The following results were obtained.

(1) The measured values of cutting temperature in the above metals were arranged in ascending order as follows.

$$\text{Mg} \leq \text{Al} < \text{Cu} < \text{Fe}$$

(2) It was observed that cutting temperature rase with the increase of cutting speed or feed, but scarcely affected by depth of cut.

(3) Cutting temperatures of the above metals were proportional to their respective shearing stresses.

(4) The rising rates of cutting temperature in the above metals with respect to the increase of cutting speed or feed were arranged in descending order as follows.

With respect to cutting speed $\text{Mg} > \text{Cu} > \text{Al} \geq \text{Fe}$

With respect to feed $\text{Mg} > \text{Cu} > \text{Fe} > \text{Al}$

(Received June 14, 1967)

1. は し が き

著者らはさきにアルミニウムの切削性が他の金属にくらべ、どのような特徴があるかを調べる目的から、純アルミニウム、純銅、純マグネシウム、低炭素鋼の丸棒を試料とし、同一切削条件の下で切削実験を行ない、切削抵抗、切削比、摩擦係数などについて比較検討した¹⁾。

しかし構成刃先の消滅限界、表面変質層、仕上面あらさおよび工具寿命など一連の問題については切削抵抗ばかりでなく被削材と工具の接触部の温度すなわち切削温度の果す役割を追求する必要がある。このことはたとえば M. C. Shaw²⁾ の鉄鋼に関する切削温度についての報告にも述べられている。しかしながらアルミニウム合金の切削温度について系統的に取扱った報告は今日まで全然ない。このため切削性について適切な基礎資料は鉄鋼にくらべるとはるかに乏しい現状である。この意味において切削温度を知ることが基礎的に役立つばかりでなく、この種の合金の実用的見地からもきわめて重要なことと考える。本研究は被削材と工具で熱電対を構成し、切削時におこる熱起電力を切削抵抗と同時に測定しようとするもので、切削条件によつて切削温度がどのように

変化するかを調べ、まずアルミニウム (2S) の切削温度が他の工業用純金属のそれとくらべ、どのような差異があるかを明らかにしようとするものである。

2. 供試材料、切削条件および切削温度測定法

2.1 供試材料および切削条件

試料は純度99.5%アルミニウム、99.6%銅、99.9%マグネシウム、0.25%炭素鋼の4種でいずれも直径50mm以上のF材である。

切削工具は超硬合金P20〔組成、WC 76%、TiC 14%、Co 10%〕で12mm角×120mm長さの無垢バイトである。Table 1 はバイトの形状、Table 2 は切削条件を示している。使用機械、切削抵抗の測定は前報¹⁾と同じである。

2.2 熱電対の構成と温度校正曲線

切削温度の測定法としてはいろいろあるが、種々検討した結果 Gottwein の方法すなわち被削材と工具で熱電対を構成し、その接触部に生じる熱起電力を測定する方法を採用した。これによれば比較的正確な切削温度を知ることができるからである。

この方法を活用するためにはあらかじめ温度校正曲線

* 軽金属学会第31回秋期大会にて発表

** 宇都宮大学工学部 (Faculty of Engineering, University of Utsunomiya (宇都宮市 Utsunomiya shi))

を作成しておく必要がある。そのため切削工具および被削材と全く同材質の細い丸棒（本実験では直径 4 mm, 6 mm×長さ 350mm）を別途につくり、一端を接合して高温接点部とし、他端を 0°C に保持するような熱電対をつつた。この高温接点部に熱起電力既知のアルメルクロメルを押込み、この部分を加熱炉に入れて加熱冷却を繰返し、それぞれの熱起電力を自動平衡記録計にて測定した。

Fig. 1 は熱起電力測定装置のブロック線図, **Photo. 1** は高温接点部の外観である。黒色の細い丸棒は P20, 白色の弯曲しているのは 2 S, 上方保護管の見えるのはア

Table 1 Tool dimension.

Back rake angle.	0°	Side cutting edge angle.	0°
Side rake angle.	6°	End cutting edge angle.	8°
Back clearance angle.	6°	Nose radius.	0mm
Side clearance angle.	6°	Setting angle.	90°

Table 2 Cutting conditions.

Cutting speed	100~600m/min
Depth of cut	1mm, 3mm
Feed	0.04~0.32mm/rev.
Cutting fluid	None

Fig. 1 Arrangement for calibration of workpiece-tool thermocouple.

Photo. 1 Hot junction of tool (P20; black)-workpiece (2S; white) thermocouple contained chromel-alumel.

ルメルクロメルである。接合部は 2 S (外径 6 mm) の一端にあけた小穴に P20 (外径 4mm) を圧入したものでアルメルクロメルの先端は 2 S の外壁にあけた穴から P20-2S の接触端面に押込まれている。**Photo. 2** は、記録紙にえがかれた熱起電力の一例で熱感度の応答性は加熱冷却共良好であることがわかる。この場合アルメルクロメルの熱起電力は 1/5 になっている。

Photo. 2 Sensitivity of 2S-P20 thermocouple compared with chromel-alumel during the heating.

Fig. 2 Temperature calibration curves of 4 sorts metals against P20 sintered carbide.

Fig. 3 Setup for measurements of cutting temperature.

Fig. 2 はかくしてえられた4種の金属と P20 との温度校正曲線である。

2.3 切削時の熱起電力の測定法

切削実験の場合には無垢バイトの後端, 被削材の一端面中央部にそれぞれ補償導線を接着して熱電対を構成すればバイトと被削材の接触部は高温接点, 導線結合部は冷接点に相当することとなり, 冷接点は室温となる。

また, 熱起電力の測定には被削材と旋盤主軸, 工具と工具動力計を電氣的に絶縁する必要がある。前者はベークライトを主とした保持台を考案し, 後者は雲母板によりそれぞれ絶縁した。

Fig. 3 は切削温度測定装置のブロック線図で○印は高, 冷接点を示し, 絶縁部は黒一色で示している。

Photo. 3 は動力計に取付けた無垢バイトおよびバイト後端の冷接点を示し, **Photo. 4** は被削材固定用絶縁支持台および被削材よりの導線引出部, 冷接点を示す。

Photo. 5 は測定装置の全貌である。かくして切削温度の変化は切削抵抗の変化と同時に測定できた。なお, 予備実験の結果, 切削温度は比較的早期に定常状態になる

ことを確めたので同時測定は容易であつた。**Photo. 6** は記録紙に画かれた2Sの熱起電力および切削抵抗を示し, 上から主分力, 送り分力および熱起電力の順となつている。

3. 実験結果ならびに考察

3.1 切削温度, 切削抵抗, 切削比と切削速度との関係

Fig. 4a は切込 3 mm の場合の切削温度, 切削比, 切削抵抗におよぼす切削速度の影響を示した。このように一括表示したのは対応する実測値と比較するのに都合がよいと考えるからである。

まずアルミニウムについてみると切削温度は切削速度の早くなるにともなつて上昇し, 送りの多くなるにともなつて高くなつていく。たとえば送り 0.04 mm/rev, 速度 140 m/min のときの切削温度は140~150°Cであるのに対し, 送りだけを0.32mm/revにすると温度は220°Cに上昇する。送りが 0.32mm/rev で速度を 140m/min から 550m/minにすると切削温度は240°Cから320°Cとなる。

Photo. 3 Dynamometer (left) and cold junction of tool (right).

Photo. 4 Holder consisted of bakelite (right) and cold junction of workpiece (2S) (left).

Photo. 5 Experimental arrangement for the determination of cutting temperature and cutting force.

Photo. 6 Showing a chart recorded electromotive force of the cutting temperature and cutting force simultaneously.

切削比は速度のはやくなるにともなうて大きくなるが、切削抵抗は減少し、切削温度と切削抵抗は相反する傾向を示す。

銅について同じ切削条件の対応する切削温度をアルミニウムのそれと比較すると100~200℃ほど高い。たとえ

ば送り 0.32mm/rev, 速度 480m/min のときは490~500℃でアルミニウムのそれより約 200℃ 高い。

マグネシウムの切削温度は対応するアルミニウムのそれとくらべると低速では低いが高速度では同程度となっている。

Fig. 4 a, b Variations of cutting temperature, cutting ratio and cutting force as a function of the cutting speed.
 a ...depth of cut $t = 3\text{ mm}$

鉄の切削温度はアルミニウムにくらべ著しく高く、3倍に近い温度を示し、送り0.32mm/rev、速度400m/minでは920~930°Cにも達している。

切削温度は $Fe > Cu > Al \geq Mg$ の順で鉄が最も高い。しかし鉄の主成分は銅にくらべると大きな差異がないにもかかわらず鉄の切削温度は銅の約2倍である。またアルミニウムの主成分はマグネシウムにくらべると約2倍であるが、その切削温度はほぼ同程度である。

一方切削比については、アルミニウムが0.1、鉄が0.3前後であるのに対し、マグネシウムは1.0に近く、大きな差異がある。

以上のように切削温度と切削抵抗および切削比との関係は必ずしも一致していないが、切削抵抗が同一ならば切削比の大きい方が切削温度が高く、切削比が同一ならば切削抵抗の大きい方が切削温度が高くなるといえる。

Fig. 4 b は切込1mmの場合である。切込3mmのとき

Fig. 4 b ...depth of cut $t = 1\text{ mm}$

に較べて、いずれの金属についても、主分力、送り分力は著しく低下しているにもかかわらず切削温度はアルミニウムで20～30℃、銅で30～50℃、マグネシウムで20～30℃、鉄で50～100℃ 低くなっており、大幅な低下は見られない。

切削温度に大きな影響をおよぼすのは切削速度であることは明らかであるが、伊藤³⁾は超高速の切削実験について普通純度のアルミニウムの切削温度は切削速度1660 m/min で最高420℃に達し、これ以上の速度となると切削温度は降下の一途であることを示している。このことは切削温度の上昇限界を示すものとして注目すべきであるが本実験の示す最高切削温度は 550m/min のとき 320℃であるからそれ以上の速度になると切くずえ持去られる熱量が増加して切削温度の上昇率は緩慢になることを示唆しているものといえる。

3.2 アルミニウムの切削温度の計算値

アルミニウムの切削温度は400℃前後で鉄に較べると比較的低い温度範囲に限定されるから、工具、アルミニウム(2S)の熱伝導率、温度伝達率、比熱、密度が切削温度の上昇によって変化しないと仮定するとM.C. Shaw

Table 3 Chip contact length.

Cutting speed (m/min)	140	225	280	360	560
Feed (mm/rev.)					
0.04	1.5～ 2.0	1.5～ 2.0	2.0～ 2.5	2.2～ 2.7	2.2～ 2.9
0.32	4.2～ 4.7	4.5～ 5.0	5.2～ 5.7	6.0～ 6.5	6.5～ 7.5

の提示する切削温度は次式のように簡略化して表わされる。

$$\bar{\theta}_t - \theta_0 = -\frac{\tau}{J} \sqrt{\frac{V t_1 \gamma}{k_2 \rho_2 c_2}} \left[\frac{0.754 \mu \sqrt{\frac{r_c t_1}{\gamma a \sin^2 \phi}}}{1 + \frac{0.754}{A} \frac{k_3}{k_2} \sqrt{\frac{K_2}{a r_c V}}} + \frac{1}{\left(\sqrt{\frac{V t_1}{K_1 \gamma}} + 1.328 \right) \left\{ 1 + \frac{0.754}{A} \left(\frac{k_3}{k_2} \right) \sqrt{\frac{K_2}{a r_c V}} \right\}} \right] \quad \dots\dots\dots(1)$$

$\bar{\theta}_t$: 切削温度

θ_0 : 工具の最初の温度

τ : セン断面のせん断応力

J : 仕事の熱当量

Fig. 5 Comparison of computed and measured cutting temperature.

Fig. 6 Comparison of cutting temperature measured by authors with U. Nakamura's results,

V : 切削速度

t_1 : 送り (この場合送りに相当する)

γ : せん断面のせん断ひずみ

$$= \cot \phi + \tan(\phi - \alpha)$$

ϕ : せん断角

α : 工具すくい角 (横すくい角に相当する)

k_2 : 切くずの熱伝導度

c_2 : 切くずの比熱

ρ_2 : 切くずの密度

μ : すくい面の摩擦係数

Fig. 7 Variations of cutting temperature and shearing stress as a function of the cutting speed.

$$= \frac{F_t + F_c \tan \alpha}{F_c + F_t \tan \alpha}$$

F_c : 主分力

F_t : 送り分力

a : すくい面上の接触長さ

r_c : 切削比

$$\bar{A} : \frac{2}{\pi} \left[\sin^{-1} h \left(\frac{b}{2a} \right) + \frac{b}{2a} \sin^{-1} h \left(\frac{2a}{b} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{b}{2a} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{2a}{b} \right) - \frac{1}{3} \left\{ \left(\frac{2a}{b} \right) + \left(\frac{b}{2a} \right) \right\} \sqrt{1 + \left(\frac{b}{2a} \right)^2} \right]$$

b : 切込み (一般には切削幅, ここでは切込みに相当する)

k_3 : 工具の熱伝導度

K_2 : 切くずの温度伝達率

K_1 : 被削材の温度伝達率

上式で工具 P20 と 2 S の各常数⁴⁾⁵⁾ 以外は主分力, 送り分力, 切削比およびパイットと切くずとの接触長さを測定すれば切削温度の計算は可能である。

そこで, すくい面にけがき用 青色 塗料 (malachite green) を塗布し, 切削条件をかえて塗料の消失する長さ

の変化を測定した。

Table 3 は切込 1mm の場合の接触長さの測定結果である。切込 3mm の場合の接触長さは 1mm の場合と大差はなかった。**Fig. 5** にはかくして計算した 2S の切削温度を点線で示しているが, 計算値は対応する実測値に比べ 20~30°C 高い。

Fig. 6 は鉄についての中村⁶⁾の測定結果と比較したもので, 本実験は中村の結果とは切削条件に多少の差はあるが実測値に大差はない。

これらのことから本実験のような同時測定法によっても比較的正確な切削温度を求めうことを示しているといえるだろう。

3.3 切削温度とせん断応力との関係

(1)式から, 切削温度に大きな影響をもつ因子としてはせん断面のせん断応力が考えられる。そこで次式を用いてせん断応力を計算してみる。

$$\tau = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \sin \phi}{t_1 b} \dots \dots \dots (2)$$

ここで各記号は(1)式と同様である。

Fig. 7 は 4 種の合金についてを τ と切削速度との関係

Fig. 8 a...depth of cut $t = 3\text{mm}$

Fig. 8 b...depth of cut $t = 1\text{mm}$

Fig. 8 a, b Relationship of cutting temperature to the cutting speed for turning 4 sort metals.

す。τ の値を斜線で示したのはτ の計算値はほぼこの範囲に入るといふ意味である。

τ は Fe>Cu>Al>Mg の順で、鉄が最も高く、切削温度との関連性は明らかにあらわれている。

しかしτ は切削速度によってさほど変っていない。このことは、切削速度が早くなるとせん断面のせん断ひずみ速度の上昇による応力の増加と切削熱の上昇による応力の減少とが相殺するためと考えられる。

Fig. 9 a, b Relationship of cutting temperature to the feed for turning 4 sort metals.

Fig. 9 b...depth of cut t = 1mm

Table 4 Representative values of m, n, given by relation $\theta \propto V^m, \theta \propto f^n$

Depth of cut t (mm)	$\theta \propto V^m$			$\theta \propto f^n$		
	t = 1mm	t = 3mm	mean	t = 1mm	t = 3mm	mean
Materials						
Aluminium (Purity 99.5%)	n=0.319 n=0.287 ~0.366	n=0.246 n=0.244 ~0.288	n = 0.25~0.32	m=0.095 m=0.083 ~0.107	m=0.123 m=0.096 ~0.151	m=0.09~0.12
Copper (Purity 99.6%)	n=0.391 n=0.327 ~0.437	n=0.264 n=0.196 ~0.368	n = 0.26~0.39	m=0.268 m=0.196 ~0.303	m=0.199 m=0.159 ~0.256	m=0.20~0.27
Magnesium (Purity 99.9%)	n=0.473 n=0.398 ~0.516	n=0.457 n=0.457 ~0.515	n = 0.46~0.47	m=0.293 m=0.262 ~0.322	m=0.298 m=0.183 ~0.343	m=0.29~0.30
0.25 Carbon steel	n=0.341 n=0.250 ~0.595	n=0.216 n=0.216 ~0.298	n = 0.22~0.34	m=0.17 m=0.10 ~0.134	m=0.143 m=0.143 ~0.146	m=0.14~0.17

3.4 各種金属の切削速度および送りに関する温度指数

切削温度 θ と切削速度 V , 送り f との関係は一般に工具すくい角および材料にほぼ無関係に一定⁷⁾であつて一般に

$$\theta \propto V^m \dots\dots\dots(3)$$

$$\theta \propto f^n \dots\dots\dots(4)$$

で表わされる。 m は速度に関する温度指数, n は送りに関する温度指数を表す。**Fig. 8a, b** および **9a, b** は各金属の θ と V および θ と f との関係を対数目盛で表わしたもので, 曲線の傾斜はそれぞれ速度に起因する温度上昇率, 送りに起因する温度上昇率をあらわしている。

Table 4 はそれぞれの温度指数を表示したもので速度に起因する m の大小を比較すると $Mg > Cu > Al \geq Fe$ の順で, マグネシウムの温度上昇率が最も高く, アルミニウム, 鉄はこれより低いことがわかる。同様に送りによる温度指数 n は $Mg > Cu > Fe > Al$ の順に低くなり, アルミニウムの上昇率は最も低い。

3.5 切削温度と切削エネルギーとの関係

二次元切削における切削熱は一般にせん断面のせん断エネルギーおよびすくい面の摩擦エネルギーとにわけられる。そこでせん断エネルギー, 摩擦エネルギーをそれぞれ E_s , E_r とすると

$$E_s = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi)}{J} \cdot \frac{V \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \dots\dots\dots(5)$$

$$E_r = \frac{(F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha)}{J} \cdot V \cdot r_c \dots\dots\dots(6)$$

で表わされる。ここで各記号は(1)式と同様である。

E_s , E_r の値を計算すると **Fig. 10a, b** のようになる。図からいずれの材料においても E_s は E_r に比較して著しく大きくなるが切削温度と必ずしも一致しない。中村⁸⁾は鉄鋼の研究においてすくい面 6° のとき約50m/min以上の切削温度になるとせん断面の温度はほぼ一定になりすくい面の温度は速度がはやくなるにともない上昇していることを示している。このことはすくい面の摩擦エネルギーが切削温度に大きな影響をもつことを意味し, せん断面のエネルギーは速度がはやくなるほど母材, 切くずえの消費が大きく, 高速になると温度におよぼす影響が少なくなることを意味している。

Fig. 10 a, b Variations of cutting temperature, energy at the shear zone and the rake surface as a function of the cutting speed.

Fig. 10 b---depth of cut $t = 1\text{mm}$

アルミニウム、銅、マグネシウムなどの切削温度についての研究はきわめて少ないから確実なことはいえないが本実験の示す結果が鉄に比べ著しい差異のないところから見ると切削温度に大きな影響を与えるのはすくい面の摩擦エネルギーであると考えてさしつかえなからう。

4. 結 言

アルミニウム、銅、マグネシウム、低炭素鋼について近似的に二次元切削の実験を行ない、切削温度、切削比、主分力、送り分力を同時に測定し、つぎの結果がえられる。

(1) アルミニウムの切削温度は切込 1mm, 送り 0.04 mm/rev, 切削速度 140m/min の軽切削では140~150°C, 切込 3mm, 送り 0.32mm/rev, 切削速度 550m/min の重切削では240~320°Cに達する。

(2) 切削温度は切削速度、送りにより大幅に変化し、切削速度の影響は大きい。切込みの切削速度におよぼす影響は小さい。

(3) 各種金属の切削温度は $\text{Fe} > \text{Cu} > \text{Al} \geq \text{Mg}$ の順で鉄が最も大きく、アルミニウムは小さい。

(4) 各種金属の切削温度の上昇率は切削比の増大と対応している。

(5) 各種金属のせん断応力は切削温度と大きな関係を

示し、量的にも比例する。

(6) 各種金属のせん断応力はいずれも切削速度に大きな影響はない。

(7) アルミニウムの速度に関する温度指数は鉄とほぼ等しく、銅、マグネシウムより低い。

(8) アルミニウムの送りに関する温度指数は速度に関するものと同様な傾向を示す。

(9) 全切削エネルギーのうち、せん断エネルギーの占める割合の大きいのはアルミニウムでマグネシウムは最も小さい。

本研究の費用の一部は軽金属協会および軽金属奨学会よりの切削研究費によった。実験の遂行には 助手 小林氏、今市工高小杉氏、栃木工高石川氏の協力をえた。あわせて感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 栗原, 菊地; 軽金属, **16** (1966), 188.
- 2) M. C. Shaw: "Metal Cutting Principles" (1965)
- 3) 伊藤鎮; 機械学会誌, **55-405** (1952), 626.
- 4) 機械工学便覧, 機械学会
- 5) 金属便覧 (1960), 丸善
- 6) 中村祐道; 学位論文
- 7) Paul H. Black: Theory of Metal Cutting, McGraw (1962).