金属片の研削切断特性*

佐 藤 耕 吉** 山 本 富 才**

Abrasive Cutoff Characteristics of
Metal Members

Koukichi SATO and Hisatomo YAMAMOTO

Abrasive cutoff wheels are fed radially into usual metal members, that is, steel, brass, copper and aluminium. The removal (feed) rate and grinding ratio are measured in terms of the wheel speed and the feed load which are chief variables on the working conditions. The performance of working is characterized by the average depth of cut; g . Increase of feed load gets g deeper and the removal rate higher for all members. At higher wheel speed, brass is cut off at higher rate and g is almost

kept constant. In the case of steel, the higher wheel speed has the adverse effect on the removal rate. The higher removal rate brings on the more wear of wheel. From this performance, the product of removal rate and grinding ratio is presented to be a characteristic of efficiency or machinability. Cutoff of steel makes a difference in about twice the efficiency among wheels. The machinability of steel is a fiftieth of brass, and that of copper and aluminium mediate between the former two.

Key words: abrasive cutoff, feed load, wheel speed, average depth of cut, removal (feed) rate, grinding ratio, efficiency.

1. 緒 言

研削切断は金属材料に限らずほとんどの材質材料に適用でき、迅速で良好な切断面が得られ、経済的にも有利な作業を行える可能性をもっている。それゆえ最近種々の面からの研究が見うけられるようになってきた^{1)~4)}。いずれも上述の可能性追求のための最適作業条件を見出すことを目的としている。本研究もそれを志向しているが、そのためにはまず様々な作業要因のもとで行われる切断作業において、どのような現象が発生するか、すなわち研削切断特性を知る必要がある。

本報はごく限られた作業条件、方法のもとでの実験結果であるが、切断性能、能率に及ぼす砥石周速と送り力の効果に関し金属の研削切断において一般に通じる特性を示しているものと考え報告する。普遍的金属材料である軟鋼、黄銅、銅、アルミニウムの帯材を被切断試料とし、市販数種の切断砥石(厚さ2.5 mm)で切断実験を行い、各作動条件に対応する研削率、研削比を求め、それにより各砥石を通してみられる金属材料の被研削切断特性を探る。

2. 研削切断特性

研削切断特性上考慮すべき要因応答事項を図1に示す。研削切断はいかなる作業条件下でも砥石周速と送り

力を必要とし、その作動条件の選定は作業性能、能率向上の重要な要因である。研削仕上加工では「粗さ」などの表面精度が主目的とされるが、研削切断では切断面の質のはかに重研削性、つまり単位時間当たりの研削量「研削率」を追求する。砥石の切れ味や材料の被削性は研削切断においては研削率で数量的に代表させることができる。また作業の能率経済性を考えるうえで砥石の損耗「研削比」も重要な事項である。

研削仕上作業において、砥石切込み量や周速の作動条件の設定に伴う「砥粒切込み深さ」は重要なパラメータであるが、研削切断では切断という作業機構の性質上、砥石切込み量の設定は行われないので、代わりに砥石周速や送り力の作動条件の効果を図2に示す「平均切り深さ」 g (付記参照)で判定することができる。

Fig.1 The process of abrasive cutoff

* 原稿受付 昭和57年3月29日。昭和56年度精機学会
秋季大会学術講演会(昭和56年11月5日)にて発表。

** 正会員 防衛大学校(横須賀市走水1-10-20)

Fig. 2 The average depth of cutoff g ; Wheel speed, V ; Feed load, d ; Removal (feed) rate, h ; Height of work, l ; Length of work

Table 1 Experimental conditions

Wheel	Grits; Al_2O_3 , SiC Bond; Rubber, Resin Disk size; Diameter 305 mm, Width 2.5 mm, Spindle hole dia. 2.5 mm
Workpiece	Steel SS 41 ($H_V=161$) Brass BsP 3 ($H_V=208$) Copper Cu ($H_V=97$) Aluminium Al ($H_V=46$) Plate dimension; length 30 mm $\times$ height 4 mm (Cross sectional area)
Type of machining	Dry Constant load fed radially into the wheel Belting drive by 3 HP 3-phase motor
Operating conditions	Wheel speed; 2 000-4 700 m/min (revolution); (2 200-5 000 rpm) Feed load; 1-3 kg (per contact area); (0.1-0.3 kg/mm ²)

$$g = \frac{d}{V} h \quad (1)$$

ここに、 d : 切断速度(研削率), V : 砥石周速, h : 加工物高さ。

作業能率を評価するうえで砥石損耗を無視することはできない。そこで後記の実験結果を考慮して砥石性能特性値 C を次式で定めることができる。

$$C = MG \quad (2)$$

ここに、 M : 研削率(単位時間当たりの研削量), G : 研削比(研削量/砥石減耗量)

M と G の両者とも大きいことが望まれるので、その積 C は大きいほど高能率を示すことになる。

3. 実験条件

切断機は作動条件と実験結果を簡易に設定検出できるように乾式で図2に示したように砥石半径方向に加工物を定荷重で送る方式の試験機を試作使用した。

砥石の駆動は3相3馬力電動機によりプーリ・ベルト駆動の無段変速機にて回転を与える。切断時における回転数の低下は1%程度であった。

砥石は各メーカーの市販品で、寸法形状などを表1に示す。砥石の減耗量はノギスあるいはマイクロメータヘッドで直径を十字方向に測定、平均して求める。

被切断材はいずれも市販の帯材で切断寸法は表1に示したように、また幅も80 mmの同一寸法の試料片にそろえた。試料切断面の両側は試料送り台車に固定するためのボルト穴があげられている。表中の H_V はマイクロビッカース硬度の測定値である。試料送り台車は送り力となるおもりにより滑車を介して砥石半径方向に水平に送られる。送り力と砥石周速の作動条件は表1に示す範囲で、図1の太枠の事項に主眼を置いた実験を行った。

4. 実験結果と考察

4.1 研削率(切断速度)

4.1.1 送り力の効果

各試料の切断削り代は同一寸法形状(30 $\times$ 4 $\times$ 2.5 mm³)であるから、研削率は試料1個の切断(長さ $l=30$ mm)に要する時間 t を測定し、切断速度 $d=l/t$ をもって比較検討する。

砥石周速を本装置における最低である $V=2\,100$ m/min に保ち、各材質試料の切断速度に対する送り荷重 W による効果を図3に3種の砥石について示す。

どの砥石においても軟鋼の d は小さく、ほかの材質では砥石によって d の大小関係は若干異なるが、いずれにしても W の増大により d は大となり、砥粒切込み深さを大にする効果は明らかである。

黄銅と銅の d は W にほぼ比例し、すなわち

$$d \propto W^n \quad (n > 0) \quad (3)$$

において $n=1$ であるが、軟鋼では $n > 1$ で W の d に対する効果が著しい。アルミニウムはゴム砥石では $n < 1$ 、レジノイド砥石では $n > 1$ の傾向がみられ、これは下記に関連する溶融アルミニウムと砥石結合剤との濡れ溶着の影響程度差の現れかと思われる。

本実験を通して砥石の破壊はアルミニウムの切断時にもみ発生した。その原因としては材質の融点が低く(660 $^{\circ}$ C)かつ展性が大なので、研削点温度が融点を超える(サーモスポットセンサによる実測)熱のため砥石両側面へ溶着し、それが不均衡のとき砥石に対する曲げ破壊モーメントの作用をなすと考えられる。この点からアルミニウムは研削切断性の難しい材料といえる。

4.1.2 砥石周速の効果

次に砥石周速 V を大にすると切断速度はどう変わるかを各材質について切断所要時間 t で示したのが図4, 5,

Fig. 3 Feed rate d vs. feed load W for each work V ; Wheel speed

Fig. 4 The effect of wheel speed V on cutoff time t vs. feed load W for a brass piece

6と7である。

V を大にする場合それに見合う研削率の増加が期待されなければならない。砥粒切込み深さが送り力（法線分力）によって一意に決まるとするならば、式(3)からみて g を一定とすると、 V の増加に比例して切断速度 d も大になるはずである。つまり切断時間は短縮されなければならない。黄銅は V の増大とともに t は短縮され、 W が一定の条件では V にほぼ比例した d が得られる。したがって図8(a)に示すように V に対して g はほぼ一定となり、同図(b)のように V によらず W に比例して g は増大する。

黄銅切断では作業の継続に伴う砥石切れ味の変化はなく、 V と W の作動条件に対応したほぼ一定の研削率が得られる。これに対して軟鋼切断では（図7）低周速

Fig. 5 The effect of wheel speed V on cutoff time t vs. feed load W for a copper piece

(2100 m/min)で高荷重(3 kg)の時は定常的な研削率を保持するが、 V を大の条件にするに従い切断回数とともに t は指数関数的に長くなる。この間の砥石作業面を顕微鏡写真撮影すると目つぶれから目つまり状態へと劣化して行くことが観察される。低周速においても W を小の条件にするに従い、図9に示すように切断回数 n とともに t は周期的に増減する現象が発生する。この切れ味変動は目つぶれ状態へと劣化しつつある砥石面が一皮むけるような砥粒切れ刃の脱落更新によるもので、切断砥石の自生作用と言える切れ味回復の繰返し現象である。小荷重ほど砥石面更新に時間がかかり、高荷重では砥粒に対する脱落作用力が大きいので切れ刃の更新が頻

Fig. 6 The effect of wheel speed V on cutoff time t vs. feed load W for an aluminium piece

Fig. 7 Cutoff time t for a steel piece in successive operation n
 W ; Feed load, V ; Wheel speed

繁に行われ、定常的な切れ味を持続することができる。そのため次節に記すようによく切れる状態では砥石の減耗量は大きい。高周速では研削発熱量が大きいためあって溶着による目づまり状態になりやすく、その状態になると砥石面の更新つまり砥石の自生作用は望めなくなり、その作動条件下では一層ひどい目づまり状態へと移行し、研削率は0へと近づいて行く。

材料の硬さは被削性の一つの目安であるが、本試料の軟鋼は黄銅よりビッカース硬度は大きくないが、上記のように砥石周速効果に関して対照的な難被削性を示す。両者の切りくずを採取比較したところ、黄銅は高速にするに従い流れ型切りくずからぜい性破壊のむしり型切りくずの発生する割合が多くなり、軟鋼では溶融型切粉が

Fig. 8 The average depth of cutoff g vs. (a) wheel speed V and (b) feed load W for brass works

Fig. 9 Cutoff time t for a steel piece in successive operation n of the same feed load level W
 V ; Wheel speed

多くなる。両材質の塑性変形速度に対する粘弾性的抵抗力の相違が砥石周速効果の相違をもたらす主因となっていると思われる。

銅に対しては(図5) C 36 cM 砥石では V を大にすると研削率を大にすることができるが、A 60 cK 砥石では 3750 m/min の V で研削率は最大となり、それ以上の V では低下する。また後者の砥石は前者よりも全般に研削率は低いが、これはほかの砥石の実験結果も考慮すると A 系と C 系砥粒との性能差によるものでなく、粒度の大小に基づく仕事量の差が表れたと判断される。

アルミニウムに対しても(図6) 粒度大の砥石の方が研削率大であるが、両砥石とも V を上げることによる研削率の増大は、軟鋼のような全面的な研削率の低下をもたらすことはないが、あまり期待できないという結果である。アルミニウムの静的破壊強度は試料4材質の中で

Table 2 Reduction of wheel dia. (305 mm) for a workpiece (cross sectional area $30 \times 4 \text{ mm}^2$)

Wheel	Unit: mm			
	Work			
	Steel	Brass	Copper	Aluminium
C 36 cM(R)	0.5	0.03	0.18	0.14
A 60 cK(R)	0.6	0.03	0.19	0.14
A 36 cV(R)	0.1	0.02	0.08	0.14
A 36 P(B)			0.08	0.21
AXcN(B)	0.4	0.01	0.23	0.31

最も弱いのであるが、先に述べたような理由の難研削切断性をもっていて、高周速による研削熱の増大は材料の粘弾性を助長し研削作用を妨げるものと思われる。

以上 4 材質の研削率 M に対する砥石周速 V の効果を $\Delta M/\Delta V$ の値で特徴づけてみると、

軟鋼：負，黄銅：正，銅：0 または正（砥粒粒度による），アルミニウム：0

と記すことができる。

4.2 研削比

$V=2100 \text{ m/min}$, $W=3 \text{ kg}$ の作動条件における各材質試料 1 個の切断に対する砥石直径減の平均値を表 2 に示す。砥石の損耗においても対照的に、黄銅は軟鋼に比べて 1/10 程度の損耗量で切断できる。銅とアルミニウムはその中間程度の損耗量である。砥石の損耗は個々の結合度が大きな要因となり、結合度表示 V の砥石はやはり損耗量が少ない。しかしアルミニウムに対しては低結合度砥石と同程度の損耗をする。レジノイド砥石の銅とアルミニウムに対する損耗量はゴム砥石に比べて大きくになっている。

砥石損耗量が大きい軟鋼切断において個々の砥石について、研削率 M (切断速度 d) と砥石直径減 r の関係をみ

Fig. 11 Weight grinding ratio G' corresponding to fig. 9

てみると図 10 のようになっている。また図 9 における切粉を採取し脱落砥粒と軟鋼切りくずを磁気選別し、その重量をとった重量研削比 G' を図 11 に示す。

研削率大のときは砥石損耗量も大きく、比例関係をなしている。この比例関係における砥石損耗量は、上記では本実験試料 1 個の切断に対するものであるから、一般化のためには研削比 G の逆数で表さねばならぬ。そこで C を比例定数として

$$M = C \frac{1}{G} \quad (4)$$

の関係が成立する。したがって

$$C = GM \quad (5)$$

つまり研削率と研削比は反比例の関係にあり、研削率を大にすると損耗量も大になる。なお、単位時間当たりの砥石損耗量 D は式 (4) より

Fig. 10 Reduction r of wheel dia. corresponding to feed rate d vs. feed load W for a steel piece

$$D = \frac{1}{C} M^2 \quad (6)$$

となる。 C は V と W の作動条件によらない定数であるから、その値が大きいほどその砥石の G と M が大で、能率性能が大きいことを示す特性値とすることができる(M が増大せず G も減少するような、その砥石の C 値を下げる作動条件は「目こぼれ作業状態」と規定できよう)。

本実験において全般に砥粒大で結合度大の砥石の能率が高く、そうでない砥石と軟鋼切断の場合の C 値を比較すると約2倍の相違がある。

ほかの材質材料では試料1個の切断における砥石直径減は僅少で、 M の変化に対する G の明確な測定差は得られなかったが、やはり各材質に対応した一定値 $C=GM$ の関係が成り立っていると考えられる。砥石性能と加工物の被削性は作業能率上、盾の両面をなすものであるから、 C 値は各材質材料の被研削切断性を表す数値とみることできる。各材質試料に対する作業能率は前記のように砥石規格性能差よりも加工物の被削性によるところが大であり、本実験結果の C 値で比較してみると、黄銅は軟鋼の約50倍程度の良切断性をもち、銅とアルミニウムはその中間に位置する。

5. ま と め

4種の金属片(長さ30 mm, 高さ4 mm)を砥石(厚さ2.5 mm)半径方向定荷重送りで乾式研削切断した結果、次のような特性をもつことを見出した。

- (1) 各材質とも送り荷重 W (1~3 kg)を大にすると研削率 M は大になるが、 $M \propto W^n$ ($n > 0$)において、軟鋼: $n > 1$, 黄銅と銅: $n = 1$, アルミニウム: $n \approx 1$ (砥石結合剤による)となる。
- (2) 砥石周速 V (2100~4700 m/min)の効果は $\Delta M / \Delta V$ において、軟鋼: 負(V を大にすると M は低下、黄銅: 正(ΔV に比例して ΔM は増加)、銅: 0または正(砥粒粒度による)、アルミニウム: 0となる。
- (3) 軟鋼は作動条件により砥石作業面状態を著しく変化させ、砥石の自生作用的切れ味変化の周期現象を呈する作動条件がある。
- (4) アルミニウムは溶着作用による砥石の破壊をもた

Fig. A Grain depth of cut g_0
D; Wheel dia., V; Wheel speed, d; Feed rate, h;
Depth setting

らしやすい。

- (5) 研削比 G と研削率 M は反比例関係にあり、定数 $C=GM$ は作業能率性能を表す特性値とすることができる。
- (6) 全般に砥粒大で結合度大の砥石の能率性能はそうでない砥石の約2倍の C 値をもつが、各材質に対する能率は砥石規格要因よりも材質の被削性に左右され、黄銅は軟鋼よりも約50倍の C 値をもち、銅とアルミニウムはその中間に位置する。

終わりに本実験研究を行うにあたり本校木村康之教授の御教示をいただいたことに感謝いたします。

[付 記] 平均切取り深さについて

図2のように長さ l の試料を一樣な切りくず深さ g で分割し、その総個数 l/g を h 方向で接続した全長 hl/g は、砥石走行距離 Vt に等しい(t は切断所要時間)ので、 $Vt = hl/g$ 。ここで切断速度 $d = l/t$ を代入して式(1)が求まる。

また図Aの平面研削における「平均砥粒切込み深さ」

$$g_0 = a \frac{d}{V} \sqrt{\frac{h}{D}}$$

において切れ刃ピッチ a を接触弧 $\sqrt{hD}$ に等しいとすると式(1)にすることができる。

参 考 文 献

- 1) 中村正躬: 研削切断の作業条件最適化に関する研究, 精密機械, 42, 4 (1976) 281.
- 2) 松尾哲夫, 小田博道: 研削切断の高能率化に関する研究——被削材回転の効果の検討, 精密機械, 44, 12 (1978) 1489.
- 3) 長谷川素由, 中西佑二: 定荷重研削切断加工に関する研究(第1報)——実験計画法に基づく研削切断特性の解析, 精密機械, 47, 6 (1981) 688.
- 4) 長谷川素由, 中西佑二: 定荷重研削切断加工に関する研究(第2報)——切断特性の定常確率過程解析, 精密機械, 48, 3 (1982) 366.