

合金鋼 SCM 4 の加熱切削

瀬戸 雅文*・田戸 保*・谷口 正紀**

Hot Machining of Alloy Steel SCM 4

Masafumi SETO, Tamotsu TADO and Masaki TANIGUCHI

Abstract

In this report, cutting resistance, surface roughness and tool wear were observed when SCM 4 steel was cut with carbide and ceramic tools under electric resistance heating: and then, the effects of the tool wear on the cutting resistance and on the surface roughness, tool life and heating method were discussed.

The main results are as follows:

- (1) The decrease of grooving wear by heating the workpiece is due to the decrease of cutting resistance and surface roughness.
- (2) When the steel is cut with the carbide tool at the cutting speed of 80m/min, the heating of the workpiece makes the surface roughness better, the cutting resistance lower and the tool life longer.

The same result is obtained when it is cut with the ceramic tool at the cutting speed of 100m/min.

- (3) The heating method for the ceramic tool has many demerits and is difficult to be put into practice.

1. ま え が き

加熱切削の目的が元来難削材の被削性を改善することにあることは周知のとおりで、これまで多くの研究がなされ、仕上面あらさの向上¹⁾²⁾、切削抵抗(平均値および変動)の低下³⁾⁴⁾、その他⁵⁾さまざまな結果が報告されている。しかし、これらの研究はいずれも切削初期における被削性に対する検討であって、工具摩耗にともなう被削性の推移については検討が行われていない。

また、工具摩耗の低下⁶⁾についても一部明らかにされているが、工具寿命についての研究は少ない。すなわち、超硬工具を用いた結果は二三発表されているが、セラミック工具およびサーメット工具に対しては S45C および高 M_n 鋼を被削材とする結果⁷⁾が近年報じられている程度である。

いっぽう、加熱方法に関しても電弧加熱法、火炎加熱法、高周波誘導加熱法および通電加熱法など種々の方法が考案されているが、現場への適用に際しては、なおさまざまな問題を残している。このことは、加熱切削が被削性の改善に大きな役割を果すことを認めながらも、現

場への進出をおくらす一因をなしているものと考えられる。そのため、摩擦加熱法⁸⁾など新しい加熱法の開発も行なわれてはいるが、現状では通電加熱法⁹⁾が比較的欠点も少なく、とくに、超硬工具に対しては最も効果的な加熱法と考えられる。しかし、セラミック工具に対しては適用不可能なため、筆者らはセラミック工具に対しても適用可能な局部電気抵抗加熱法¹⁰⁾を考案し、その効果について検討を行ってきた。この加熱法も現状ではいまだ十分ではなく、いくつかの欠点を残している。

本報告では前述のような現状を考慮の上、SCM 4 合金鋼に対して JISB 4011 の切削試験(工具寿命試験)を行ない、加熱効果を検討するとともに、切削の進行にともなう生ずる工具摩耗が仕上面あらさや切削抵抗にどのように影響するかを、実験的に検討を行なった。さらに、セラミック工具に対して適用可能な加熱法、すなわち、チップブレーカ・切りくず間通電加熱法を用い、その実用性についても検討を行なった。

2. 実験装置、供試材料および実験方法

2.1 実験装置

実験に使用した工作機械は大隈鉄工所製 LS 高速実用旋盤(無段変速に改造)で、その主な仕様はベッド上の振り450mm、両センチ間の距離800

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

** 山口大学工業短期大学部機械工学科

mm, 主軸回転数35~1800rpmの12段変速, 主電動機5.5 kwである。

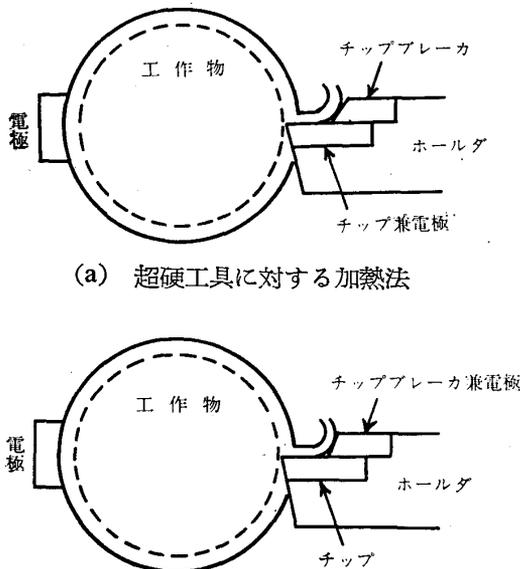
2.2 使用工具 使用工具は31—3形メカニカルグラップバイトで, 工具形状は -5° , -7° , 5° , 7° , 15° . 0.8mm, チップ材種は超硬合金P20および白色系セラミックである。なお, チップブレードの位置は予備実験結果から切刃とチップブレードとの間隔を2mmとした。すなわち, セラミック工具に対する加熱方法ではチップブレードが, 加熱用の電極として兼用されることから, その間隔を2mm以上にすると低切削速度域で切りくずとチップブレードとの接触が断続的な接触となるため通電不可能となり, 高速域においては切りくずの破断および流出が悪化する。また, 2mm以下では通電によって軟化した切りくずが被削材とチップブレードとの間で圧縮停滞して切削不可能となりがちである。

2.3 被削材 被削材にはクロームモリブデン鋼(SCM—4)を用いた。その成分を表1に示す。形状は $106\phi\text{mm} \times 500\text{mm}$ で, 被削材の剛性を考慮して直径約60mmになるまで切削した。

表1 被削材の化学成分(%)

	Si	C	Mn	P	S	Cr	Mo
SCM-4	0.31	0.37	0.72	0.011	0.006	1.15	0.19

2.4 加熱方法 加熱方法の略図を図1に示す。超硬工具に対しては刃先を電極とするいわゆる通電加熱方式(a), セラミック工具に対してはチップブレードを電



(a) 超硬工具に対する加熱法
(b) セラミック工具に対する加熱法
図1 加熱方法

極とし, チップブレード・切りくず間に通電する加熱方式(b)を採用した。

2.5 切削条件 切削方式は三次元長手方向切削で, 切削条件は切込み1.0mm, 送り0.15mm/revとし, 切削速度は超硬工具の場合300, 200, 100, 80m/min, セラミック工具の場合400, 300, 200, 100m/minである。なお, 加熱電流は200A(交流)一定とした。

2.6 各種測定 工具摩耗の測定にはオリンパス製STM形小形工具顕微鏡を用い, 各逃げ面摩耗幅を測定した。切削抵抗は機械試験所式KSA500型切削動力計, 新興通信製DS6/RJ形動ひずみ測定器および三栄測器製FR—201形ビジグラフを用いて三分力を測定した。

仕上面あらさの測定には東京精密製デルタ表面あらさ計(サーフコム)を用いて平均あらさ R_a を測定した。ただし, 摺動速度3mm/S, カットオフ値0.75mmである。

3. 実験結果および考察

3.1 切削抵抗 切削抵抗は種々の影響によつてはげしく変動し, その変動は切削速度などによつても異なるが, 本報では平均値をとるとともに, 三分力の合力を切削抵抗値として示した。図2は工具損傷を無視しうる切削開始直後の切削抵抗とフランク摩耗が0.2mmに達したとき, すなわち, 切削終期の抵抗を切削速度との関係で示したものである。また, 工具摩耗にともなう切削抵抗の推移を図3(超硬工具, 80m/minおよび200m/min)および図4(セラミック工具, 100m/minおよび400m/min)に示す。

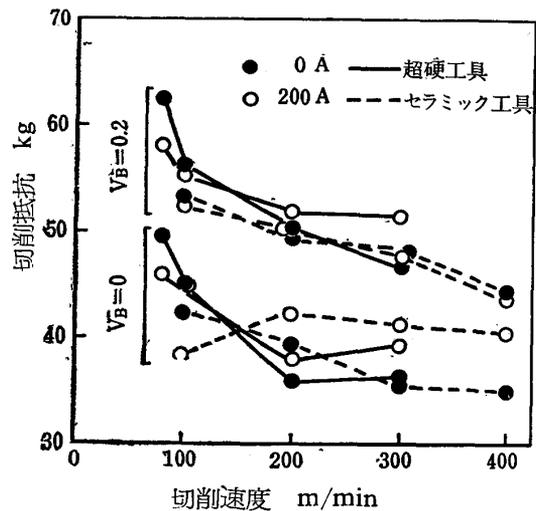


図2 切削速度と切削抵抗との関係
切込み: 1.0mm
送り: 0.15mm/rev

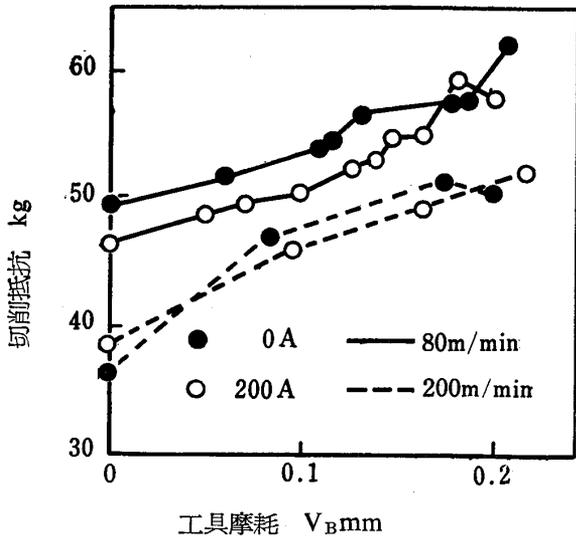


図3 工具摩耗と切削抵抗との関係
 工具：超硬工具
 切込み：1.0mm
 送り：0.15mm/rev

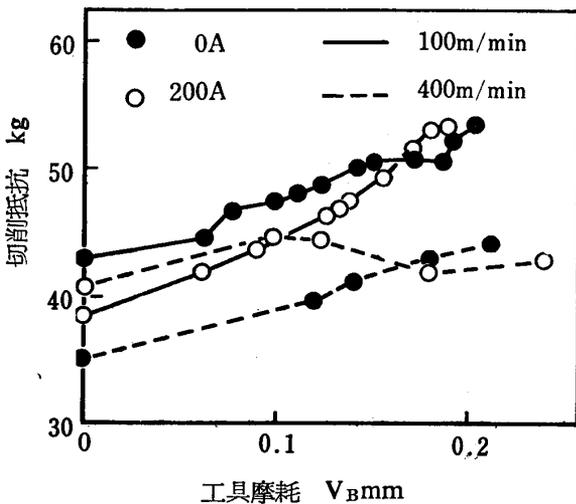


図4 工具摩耗と切削抵抗との関係
 工具：セラミック工具
 切込み：1.0mm
 送り：0.15mm/rev

超硬工具の場合、80m/minにおいては終始加熱効果が認められ、とくに、切削初期から中期では切削抵抗の低下が明らかである。100m/minにおいてはほとんど加熱効果が認められず、200~300m/minにおいてはむしろ切削抵抗が増加している。いずれの切削速度においても切削抵抗は工具摩耗（逃げ面摩耗）にほぼ比例して増加し、その増加率は80~100m/minに比べて、200~300m/minの方がやや大きい。

80m/minにおいて加熱効果すなわち抵抗の減少が認められるのは、後述(3.3項)のごとく被削材の軟化、とくに、加工硬化層（表層部すなわち境界層）の軟化およびそれともなう境界摩耗の減少によるものと考えられる。また、200~300m/minにおいて加熱切削の場合、むしろ切削抵抗が増加するのは、主として切りくず接触長さの増加およびそれともなう境界摩耗の成長に基因するものと考えられる。

セラミック工具の場合、100m/minにおいては加熱効果が認められるが、200~400m/minにおいては、いずれも加熱によって抵抗が増加している。また、工具摩耗の影響は100m/minにおいては加熱切削に大きく現われ、切削終期では逆に抵抗が大きくなっている。200~400m/minにおいては切削初期から中期にかけて加熱するといちじるしく悪化するが、終期においては通常切削と加熱切削との差異がほとんどなく、むしろ、加熱によって抵抗が減少している。なお、工具摩耗にともなう抵抗の増加は超硬の場合と同じようにほぼ比例的である。

100m/minにおいて加熱効果が現われるのは超硬工具の場合と同じように被削材の軟化と境界層の軟化およびそれともなう損耗の減少によるものと考えられるが、切削終期に現われる抵抗増加は非切削領域の異状チップングが影響しはじめたのではないかと考えられる。

200~400m/minにおいて抵抗が増加するのは加熱方法に問題があるためで、すなわち、切りくず流出速度が増加するにつれてせん断領域の加熱効果が減少し、チップブレイカと工作物との間の切りくずが加熱されるだけに止まるため軟化した切りくずがチップブレイカ・工作物間で圧縮され工具との接触面積を増大するとともに、電極としてのチップブレイカと切りくずとの接触抵抗が増加し、この接点の温度上昇がチップブレイカへの切りくずの溶着を促進するためと考える。なお、加熱による接触面積の増大は切削初期から終期にいたるまでほとんど変わらず、したがって、摩耗の進行にともなう抵抗の増加率は加熱によって減少するものと考えられる。

いっぽう、工具寿命の判定に切削抵抗（とくに背分力）の急増点を利用しようとする試みが従来なされていたが、本実験範では超硬、セラミックの両工具ともこの現象を認めることができなかった。

3.2 仕上面あらさ 仕上面あらさを支配する要因としては工作機械の振動、構成刃先など刃先への金属溶着物の生成、いったん削りとった切りくずの一部が刃先温度が高温なため再び熔融して被削材に付着することおよび工具摩耗によるあらさの増加などが考えられている。

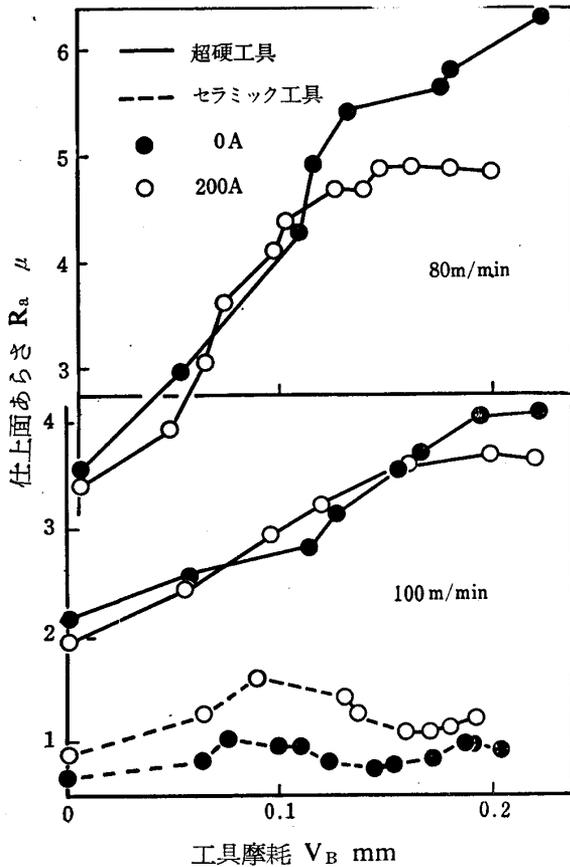


図5 工具摩と仕上面あらさとの関係
切込み：1.0mm 送り：0.15mm/rev

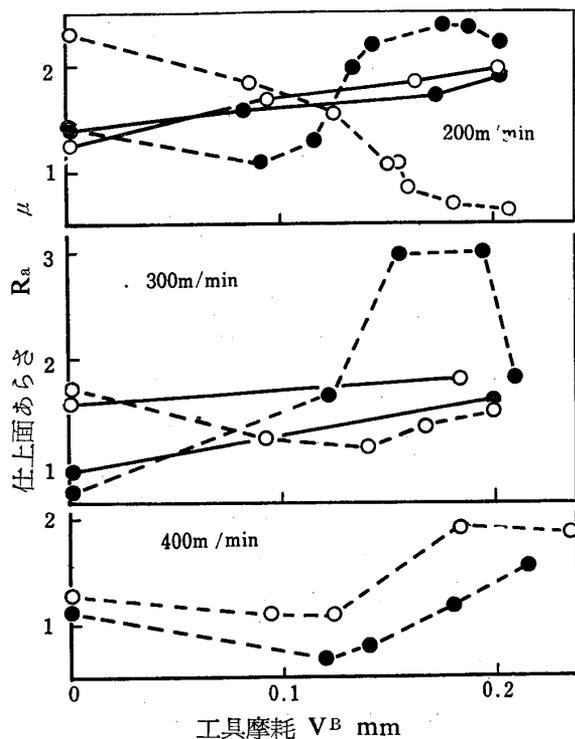


図6 工具摩と仕上面あらさとの関係
切込み：1.0mm 送り：0.15mm/rev
記号：図5と同記号

が、ここでは主として工具摩耗の面からあらさを検討するために各切削速度ごとに工具摩耗（逃げ面摩耗）と仕上面あらさとの関係を図5および図6に示す。

超硬工具の場合、80m/minおよび100m/minにおいては切削中期から終期に加熱効果が認められ、仕上面あらさを減ずるが、200~300m/minではほとんど加熱効果がなく300m/minにおいてはむしろあらさが大きくなっている。また、工具摩耗の影響はいずれの切削速度においてもほぼ比例的で、その勾配は低速になるほど大きい。低速域において加熱効果が現われるのは加熱によって境界摩耗の成長が抑制されるため、高速域における悪化の原因は切りくずの再溶融付着によるものと考えられる。

セラミック工具の場合、超硬具の場合のような比例的増加はみられず、200~400m/minにおいては通常切削では逃げ面摩耗（ V_B ）0.1mm付近までわずかな変動を示すが、 V_B 0.1mm以上になると仕上面あらさが急激に増加する。加熱切削においてもその傾向は類似しているが、200~300m/minにおいては V_B 0.2mmまで急増点が出現しない。この急増点出現のおくれが切削終期に加熱効果をもたらしている。400m/minにおいては加熱時にも急増点を有し通常切削と平行し、しかも、常にあらさが大きい。100m/minにおいても通常・加熱切削ともほぼ平行し、加熱効果は認められないが、200~400m/minに比較してあらさの変動が小さく、その範囲は1μ以内である。また、100m/minにおいては超硬工具の場合に比較してあらさが小さく、しかも、その差は工具摩耗の増加とともに大きくなっている。

超硬工具とセラミック工具とを比較して切削の進行にともなう仕上面あらさの推移が異なるのは、仕上面あらさを支配する不確定因子、すなわち、本実験ではとくに構成刃先あるいは溶着物の生成および工具摩耗の形態が異なるためと考えられる。たとえば、100m/minにおいて超硬工具では刃先に溶着物がみられるのに対して、セラミック工具では溶着物がほとんど消滅している。さらに、工具摩耗の形態も超硬工具においては溝状の境界摩耗（Grooving wear）が発生し、その発達が大いのにに対して、セラミック工具においては境界部切刃の稜に面取り状の損傷を受けてはいるが溝状にまでは進行していない。竹山らの報告¹⁰⁾にもみられるように、前切刃の切込み終端部に発生する溝状の境界摩耗すなわち前切刃の逃げ面摩耗幅と境界摩耗長さとの差が仕上面あらさの増分に一義的に働いているように思われる。

また、セラミック工具の場合、通常切削と加熱切削と

で仕上面あらさの推移が異なるのも摩耗形態の相違によるものと考えられる。たとえば、200m/min において加熱切削では切削終期までほとんど損傷を受けないのに対して通常切削では前切削の稜が損傷を受け鈍化し切れ味が低下するために仕上面が悪化するものと思われる。

3.3 工具の損傷状態 超硬工具の写真の一例として図7に示す。前述の溝状のいわゆる境界摩耗は低速になるほど大きく、加熱効果は80m/min において認められるが、100~300m/min ではほとんど効果がない。切りくず接触長さは80~100m/min ではほとんど加熱効果がなく、高速域では加熱するとむしろ長くなる。溶着物はセラミック工具に比べると一般に多く、低速になるほど増加している。

図8はセラミック工具の場合で、境界摩耗はほとんどみられないが、前切削の境界部の稜が面取りを行なうような形で鈍化する。溶着物はほとんど認められず、100m/min においてわずかにみられる。また、加熱切削の場合、全速度域で薄膜状溶着物が付着している。切りくず接触長さは加熱すると増加する傾向にある。なお、本

加熱法の欠点の一つとして切削領域外に異常チップングが認められる。このチップングは低速になるほど大きく、とくに、100m/min においていちじるしい。しかし本実験範囲内では切削境界部（切込み始端部）まではおよんでいないので切削機能に対する影響は小さいように思う。しかし、このチップングがこれ以上発達すれば切削機能を害するばかりでなく、再研磨を考慮すれば工具寿命を短縮することとなる。（図9および図10参照）

3.4 工具寿命 工具寿命の判定にはクレータ摩耗も平行して測定するのが通例であるが、本報では逃げ面摩耗 V_B を測定し、その摩耗量が0.2mmに達したときを工具寿命としてクレータ摩耗の測定を省略した。また、寿命時間は超硬工具の80m/minの寿命時間(実測値53.8min)を100として他を表示し、工具寿命までの切削距離を参考として示した。その結果を表2に示す。

超硬工具の場合、100~300m/min では寿命に対する加熱効果はほとんどないが、80m/min では寿命がのびている。すなわち、この種の被削材に対する常用切削速度（工具メーカー推奨速度）80m/min において工具寿命が

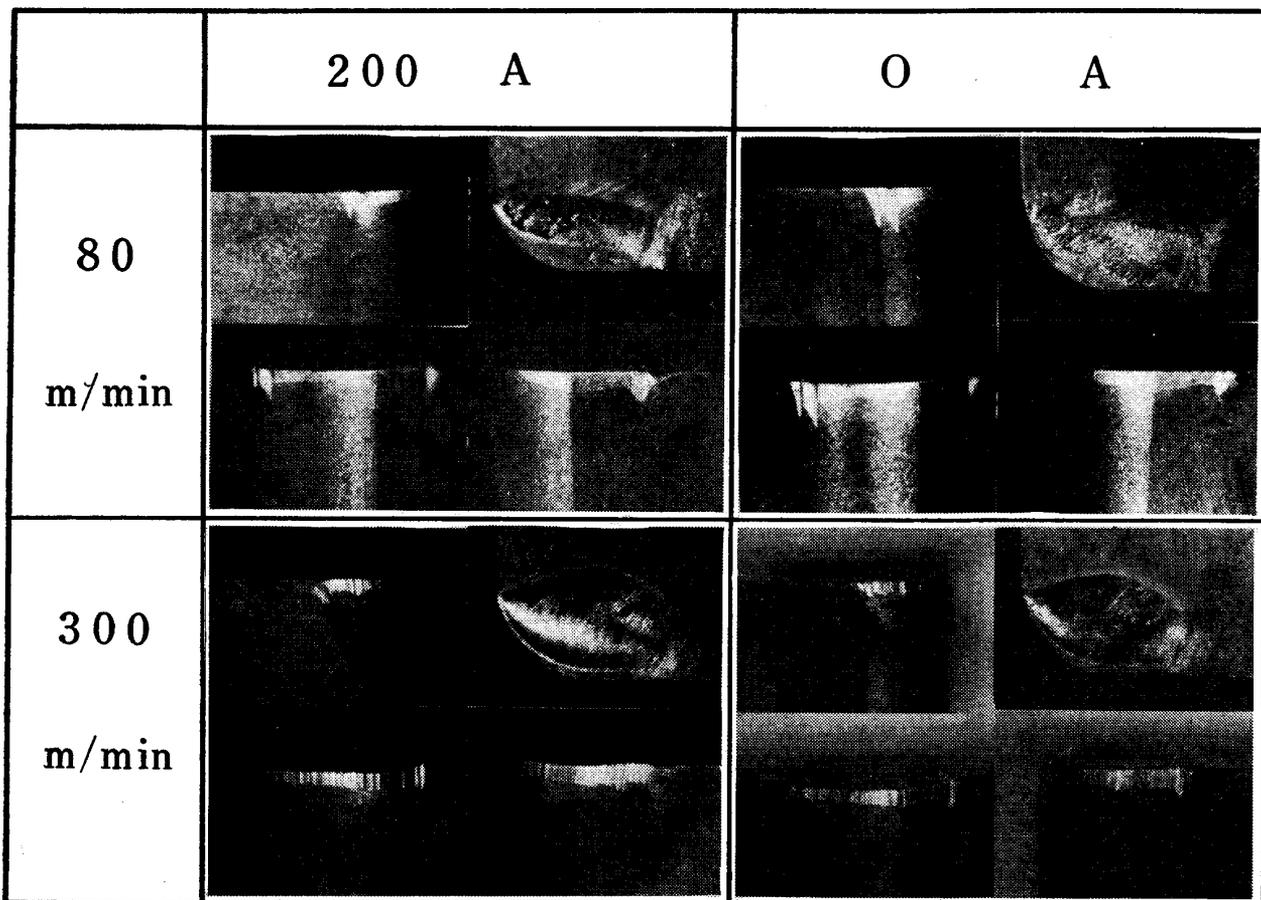


図7 超硬工具の摩耗例

切り込み：1.0mm 送り：0.15mm/rev

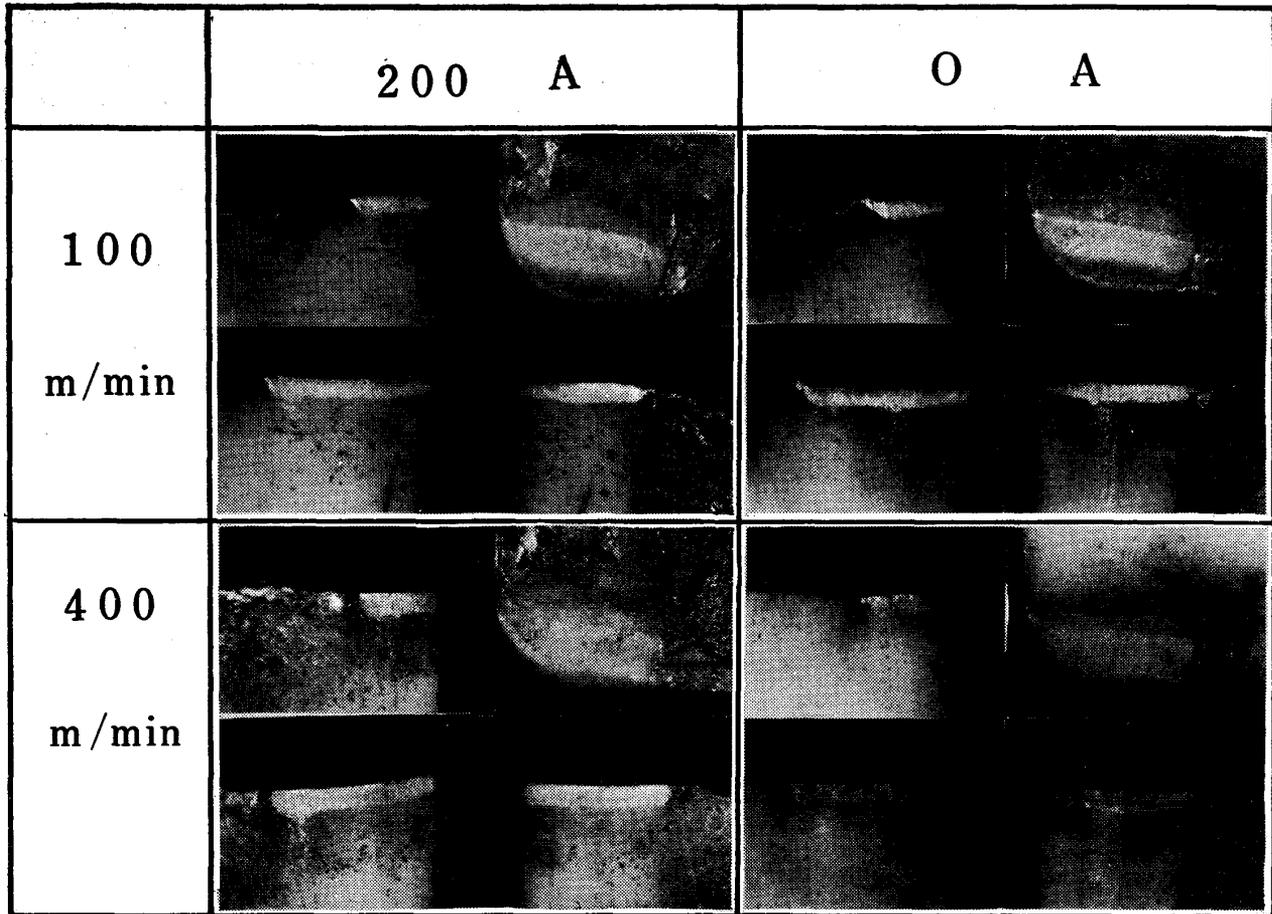


図8 セラミック工具の摩耗例

切り込み：1.0mm 送り：0.15mm/rev

表2 工具寿命 (寿命：%，切削距離：m)

切削速度 m/min		80	100	200	300	400	
超硬工具	OA	寿命	100	72	19	5	
		切削距離	4.304	3.880	2.000	750	
	200A	寿命	124	72	18	5	
		切削距離	5.320	3.900	1.900	840	
セラミック工具	OA	寿命		112	39	21	
		切削距離		6.050	4.160	3.390	2.640
	200A	寿命		122	33	18	11
		切削距離		6.550	3.600	2.940	2.600

2割程度延長される。セラミック工具の場合、200~400 m/minでは加熱効果が認められず工具寿命はかえって短縮されるが、100m/minでは加熱効果が現われ工具寿命が約1割程度延長する。

両工具を比較した場合、寿命時間としては超硬工具の

80m/minとセラミック工具の100m/minとがほぼ等しく、SCM材切削には切削量が増加するという点ではセラミック工具を用い加熱効果をさらに向上させた方が有利である。したがって、今後さらに加熱方法の改善に努力を払うべきだと考える。また、本報では逃げ面摩耗を

基準にして寿命を検討したが、本実験範囲では加工硬化層の軟化による境界摩耗の減少に加熱効果が大きいので、一般的な検討法ではないが、境界摩耗幅で比較検討することも今後試みるべきであると思う。

3.5 加熱方法に対する検討 前述のように、セラミック工具に対する加熱方法にはさまざまな方法が考えられているがいまだ決定的な方法がなく、筆者らも局部電気抵抗加熱法について検討を試みてきた。しかし、この方法にも切りくずの流出不良など操作上の欠点があるので、本報ではチップブレーカ・切りくず間通電加熱法を採用してその実用性を検討し、次のような欠点があることを認めた。

(1) 被削材からすでに分離した切りくずを加熱する結果となり、肉眼観察からも被削性改善の要所ともいうべきせん断領域の加熱が有効に行なわれない。せん断領域を赤熱しようとするれば切りくずが軟化しすぎて流出困難となる。そのため加熱電流に制限を受ける。本実験条件下では200A位が限度である。

(2) 切りくずが加熱軟化するため工具材との接触長さを増大させると同時に、軟化した切りくずの一部が再び被削材に溶着して仕上面を悪化する場合がある。

(3) チップブレーカを通過した切りくずはその厚さが増大しているため破断が困難であると同時に、チップブレーカの位置が電極としての作用を要求されるため自由に変えることができず、ブレーカ本来の作用に制約を受ける。

(4) 強固でしかも連続した切りくずは被削材にからみつき、被削材と工具を傷つける原因になると同時に、チップブレーカを離れた切りくずはカールして連続的に切削領域外の横切刃を擦過し、外部から工具の破損を招く原因となる。図9はこの状態を説明するためのモデルであって、二次的な摩耗は高温でしかも強固な切りくずに

よって急速に進行する。二次的な摩耗によって損傷した横切刃を一例として図10に示す。

(5) チップブレーカの摩耗がいちじるしい。図11はチ

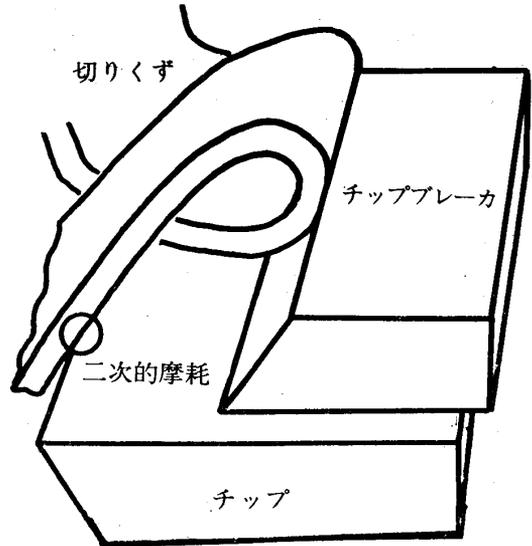


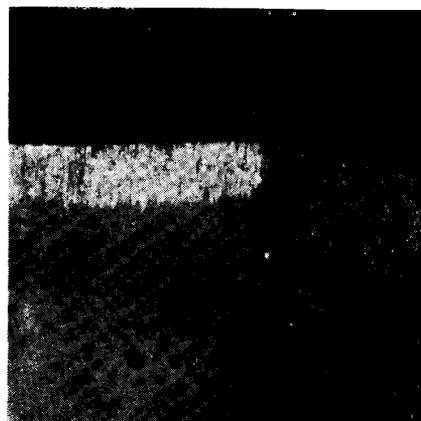
図9 セラミック工具の二次的摩耗



図11 チップブレーカーの摩耗



100 m/min



400 m/min

図10 セラミック工具の二次的摩耗例

ップブレーカの摩耗状態を示したものである。切りくずとチップブレーカとの接触部は通電回路中もっとも電気抵抗が大きく発熱も最大となるため摩耗が大きくなるものと考えられる。

以上のように本加熱法にはさまざまな欠点があるためセラミック工具に対する加熱法としては実用性に乏しく、今後さらに切りくずの処理法などを重点的に改善することが必要である。

4. む す び

本実験結果から得られたおもな結論は次のとおりである。

(1) 超硬工具に対する加熱効果；切削抵抗，仕上面あらさおよび工具寿命のいずれも 80m/min では改善されるが，100～300m/min においては効果が少ない。

(2) セラミック工具に対する加熱効果；切削抵抗および工具寿命は100m/minで改善され，200～400m/minではむしろ逆効果である。仕上面あらさは切削初期において各速度とも効果がなくむしろ悪化する。

(3) 工具摩耗にともなう切削抵抗・仕上面あらさ；切削抵抗は両工具とも摩耗にほぼ比例して増加し，超硬工具では非加熱と加熱結果とがほぼ平行し，セラミック工具では摩耗の進行とともに両切削方式の差が小さくなる。

仕上面あらさは工具損傷の形態の相違から両工具でその推移が異なる。すなわち，超硬工具ではほぼ比例的増加で，低速になるほどその増加率が大きい。加熱効果は低速域で現われ，切削進行とともにいちじるしくなる。セラミック工具では摩耗に比例せず増減をくり返す。加熱効果は200～300m/minで摩耗の進行とともに大きくなる。

(4) チップブレーカ・切りくず間通電加熱法；本加熱法ではせん断領域への加熱が十分に行なわれず，切りくずが先に軟化して接触長さおよび溶着を増し，切りくずの破断がむずかしく，切りくずが被削材にからみつくと同時に切りくずの流出によって切削領域外の横切刃を破損し，さらに，チップブレーカの損耗がいちじるしい。

(5) これまで加熱効果は切削が流れ型で行なわれ，構成刃先が消滅し，不連続切りくずの生成および構成刃先の生成脱落にともなう工作機械の振動が減少し，せん断応力が減少して被削性が改善されるといわれているが，工具摩耗にともなう被削性の推移を検討した結果，さらに，加工硬化層の軟化による境界摩耗および境界部切刃稜の欠損の減少にも着目すべきことがわかった。

参 考 文 献

- 1) 中山一雄：高温切削の基礎的研究(2)，精密機械，21，9，P. 353，(1956—9)
- 2) 谷口正紀，瀬戸雅文：加熱切削に関する研究(2)，精密機械，32，5，P. 350，(1966—5)
- 3) 大越諄，上原邦雄：“高温切削に関する研究(3)” 精密機械，26，7，P. 389，(1960—7)
- 4) 上原邦雄：“加熱切削”，機械の研究，13，12，P. 1529，(1961—12)
- 5) B. R. Macmanus：“Dynamic Effects of Machining with alternating current”，Mach. Tool Des. Res.，8，3，P. 83，(1968—3)
- 6) 篠崎襄：“合金鋼の通電加熱正面フライス加工”，機械学会論文集，28，193，P. 1067，(1962—9)
- 7) 一宮亮一：“高温切削に関する研究(切削工具の損傷形態と工具寿命)” 機械学会論文集，31，225，P. 827，(1965—5)
- 8) 一宮亮一：“高温切削に関する研究(摩擦による新しい加熱法)”，機械学会論文集，29，208，P. 1883，(1963—12)
- 9) 大越諄，上原邦雄：“通電加熱切削”，機械学会誌，66，529，P. 234，(1963—2)
- 10) 谷口正紀，瀬戸雅文：“局部電気抵抗加熱切削における切削抵抗について”，山口大学工学部研究報告，17，1，P. 53，(1966—1)
- 11) 竹山秀彦，宮坂金佳：“工具摩耗と切削仕上面あらさ”，精密機械，35，10，P. 629，(1969—10)

(昭和46年5月1日受理)