

© 1985 ISIJ

過冷オーステナイト軸受鋼の切削加工における 切削温度測定と切りくず性状

藤岡 康夫*・室 博**

Measurement of Cutting Temperature and Properties of Chips on the Machining of Bearing Steel in Supercooled Austenite

Yasuo FUJIOKA and Hiroshi MURO

Synopsis:

A new machining process, called auscutting, has been developed, in which the cutting operation is made in supercooled austenite state during quench cooling. To control the cutting conditions and lengthen the tool life, the cutting temperature is measured in this process by a tool-work thermocouple method. The black ceramic tool (Al_2O_3+TiC) used has some electric conductivity and the black ceramic-bearing steel thermocouple exhibits the thermo-e.m.f. of about 1 mV/100°C. The influence of cutting conditions on the cutting temperature and the microstructure of chips is investigated.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) The cutting temperature in auscutting is about 200°C higher than that in usual cutting process for the annealed steel and reaches 1100°C at the cutting speed of 200 m/min and the feed of 0.2 mm/rev.
- (2) The chip disposability is very good, because the chips are saw-toothed and hardened after cooling to room temperature.

1. 結 言

高炭素クロム軸受鋼を用いて軸受部品を製造する工程は、例えばベアリングレースについては圧延素材-熱間鍛造-焼なまし-切削加工-焼入れ・焼もどし-研削加工というのが一般的である。この工程には多くの加熱冷却工程が含まれており、熱エネルギーの省略を図りたいが高炭素鋼という素材の本質上、上記の工程をとらざるを得ないのが現状である。また、焼入れの際に発生する変形のため、研削代を多くとらざるを得ず、これも熱処理及び研削加工対策が必要な点のひとつであった。

これに対して著者らはすでにオースカッティングと称する方法を考案し、提案した¹⁾²⁾。それは、焼入れの際に Ms 点直上の温度で冷却を中断し、その状態（過冷オーステナイト）で切削加工を行い、その後再び冷却を行ってマルテンサイト変態を完了させようとするものである。この方法によれば切削加工前の焼なましを省略できるばかりでなく、適切な切削条件を選ぶことにより研削代の低減を図ることが可能となる²⁾。

一方、オースカッティングの切削性については、すでに報告したように①切りくず処理性が良い②超硬工具で

は工具摩耗が著しく、 Al_2O_3 に TiC を約 20% 含有した黒セラミック工具が適することなどの特徴が認められた¹⁾。このことはオースカッティングにおいては、切削温度がかなりの高温になっていることが考えられ、セラミック工具の方が超硬工具よりも高温での硬さ及び抗折力特性が良いという事実³⁾からも推察されるところである。そこでオースカッティングにおける切削条件の制御や工具寿命を延ばすための計測手段として利用する目的で、切削温度の測定を試みた。本報では黒セラミック工具に導電性があることに着目し、その熱起電力特性を明らかにすると共に工具-被削材熱電対法により切削温度測定を行い、通常の切削方法と比較検討した結果について述べる。

2. 試験片及び熱処理条件

試験片として高炭素クロム軸受鋼 (SUJ 3) を用いた。SUJ 3 の化学組成を Table 1 に示す。すべて同一ロットの球状化焼なまし材(硬さ HB 190)から目的に応じて試験片を作成し実験に供した。試験片形状は、切削実験用として外径 100 mm, 内径 70 mm, 長さ 100 mm の中空円筒形状とし、熱起電力-温度校正実験用には切削試

昭和 55 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 59 年 10 月 18 日受付 (Received Oct. 18, 1984)

* エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株)総合技術研究所 (General Technical Laboratory, NTN Toyo Bearing Co., Ltd., 1380 Higashikaizuka Iwata Shizuoka pref. 438)

** エヌ・テー・エヌ東洋ベアリング(株)総合技術研究所 工博 (General Technical Laboratory, NTN Toyo Bearing Co., Ltd.)

Table 1. Chemical compositions of SUJ 3.

							(wt %)
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	
0.95-1.10	0.40-0.70	0.90-1.15	<0.025	<0.025	0.90-1.20	—	

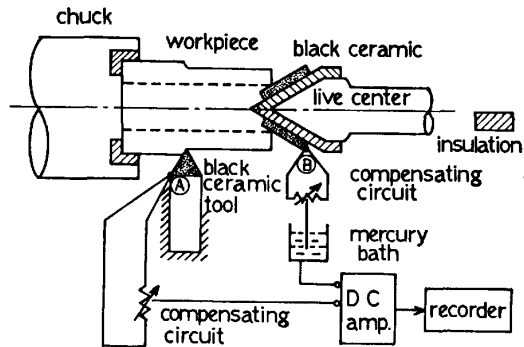


Fig. 1. Schematic view of an apparatus for measuring cutting temperature.

験片の中央部に加熱するための突起部（直径 4 mm，長さ 20 mm）をねじ込んだものを用いた。

オースカッティングは焼入冷却途中の過冷オーステナイト状態での切削加工であり，試験片の熱処理は以下のように行つた。試験片を電気炉中で 850°C の焼入温度に約 50 min 加熱した後，200°C のソルトバス中で急速冷却を行い過冷オーステナイト状態とした。ソルトバス中に約 2 min 保持し試験片の温度が Ms 点直上の約 210°C になつた時に取り出し，迅速に旋盤にチャッキングして，熱起電力-温度校正実験及び切削実験を実施した。本研究ではオースカッティング用熱処理条件はすべて同一とした。

3. 熱起電力-温度校正実験

3.1 補償回路

Fig. 1 に本実験で用いた切削温度測定装置の概略図を示す。切削中に発生する黒セラミック工具と被削材間の熱起電力 (E. M. F.) を図中に示したような回路構成により直流増幅器で増幅後，電磁オシログラフに記録した。被削材は旋盤チャック及び回転センターに対して電気的に絶縁されており，また回転接点としては電気ノイズを防止する目的で水銀浴を用いた。

本測定方法で問題となるのは，切削工具として小さなスローアウェイチップを用いた場合，切削中の工具刃先温度上昇に伴い工具側第 2 次接点（図中Ⓐ）も温度上昇が起こるため，ここで局部熱起電力が発生して精度良い測定ができない点である。またオースカッティングの場合には通常の切削方法と異なり被削材温度が約 210°C と

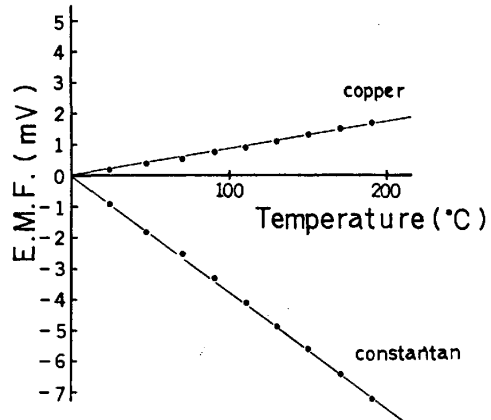


Fig. 2. Thermoelectric characteristics of copper and constantan against black ceramic.

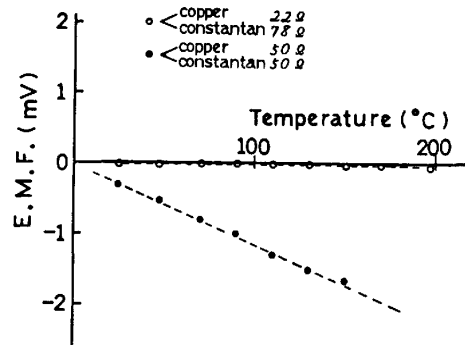


Fig. 3. Thermoelectric characteristics of compensating circuit against black ceramic.

高いため被削材側第 2 次接点（図中Ⓑ）も同様な現象が起こる。そこでこれらの局部熱起電力を補償する目的で同図中に示したような補償回路⁴⁾を用いた。文献 4) には超硬工具に対する補償回路として銅-コンスタンタンの組み合わせが最も良いことが述べられており，黒セラミック工具の場合にもこれを適用した。すなわち Fig. 2 に示したように黒セラミックに対して反対の熱起電力特性を持つ銅とコンスタンタンのリード線間に適当な抵抗を入れて，互いに発生する熱起電力を相殺するものである。

Fig. 3 に黒セラミックに対して補償回路を用いた場合の熱起電力-温度曲線を示したが，第 2 次接点が室温から約 200°C まで温度上昇した場合でも銅側：22Ω，コンスタンタン側：78Ω の抵抗を入れた場合には第 2

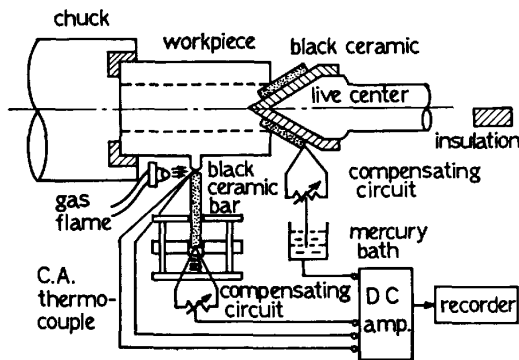


Fig. 4. Schematic view of an apparatus for calibrating tool-work thermocouple.

次接点で発生する局部熱起電力を 0.1 mV 以下とすることが可能となつた。

3.2 熱起電力-温度測定方法

Fig. 4 に被削材対黒セラミック工具の熱起電力-温度曲線を求めるための較正装置の概略を示した。切削工具と同一材質同一ロットの黒セラミック工具材棒 (5 mm 角で長さ 100 mm) を旋盤上で被削材の突起部にスプリングを介して一定圧力で押し付ける。接点にクロメル・アルメル熱電対をはさみ込み、酸素-アセチレンガス炎で加熱しながら接点の温度及び回路に発生する熱起電力を直流増幅器で増幅して電磁オシログラフに同時に記録した。昇温速度としては室温から約 1000°C までを約 1 min で急速加熱した。本測定にあたり、オースカッティングを想定した過冷オーステナイトの場合には測定を迅速に行うよう留意した。突起の付いた試験片を電気炉中で焼入温度 850°C に加熱保持後、200°C のソルトバス中に急冷し、約 2 min 保持した後取り出した。この時の試験片温度は表面で約 210°C であり、その後迅速に旋盤にチャッキングし、前述の場合と同様に熱起電力-温度曲線を求めた。チャックの爪部には熱伝導性の低い樹脂を使用し、測定中に試験片温度が低下するのを防いだ。

3.3 測定結果

以上のような較正方法により求めた熱起電力-温度測定結果を Fig. 5 及び Fig. 6 に示す。Fig. 5 は球状化焼なまし材 (以下焼なまし材と略す) の場合であり、Fig. 6 は焼入冷却途中の過冷オーステナイトの場合である。図中○は加熱時、●は冷却時 (空冷) を示す。横軸は比較接点温度からの加熱上昇温度を示しており、比較接点温度は試験片の温度で、焼なまし材: 25°C, 過冷オーステナイト: 210°C である。

焼なまし材の場合、熱起電力は加熱温度の上昇に伴いほぼ直線的に大きくなり、1100°C の温度上昇時に約

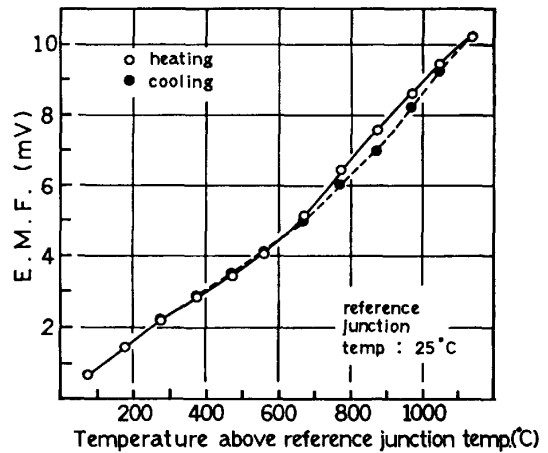


Fig. 5. Calibration curve for annealed steel.

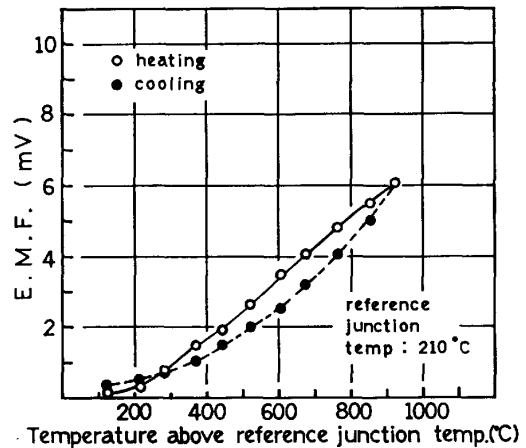


Fig. 6. Calibration curve for supercooled austenite during quench cooling.

10 mV となる。700°C 以上で加熱時と冷却時に差が認められるのは加熱近傍の組織変化による影響が現れると推察される。

一方、過冷オーステナイトの場合、焼なまし材に比べて熱起電力が小さく、900°C の温度上昇 (この時の加熱接点温度は 1100°C) に対して約 6 mV である。また加熱時と冷却時には大きな差が認められる。これは冷却時に部分的にトルスタイト及びベイナイト変態が起こり組織変化したための影響と考えられ、同一材料でも熱処理状態が異なれば熱起電力特性が変化する。比較のため、同一測定方法で測定した同一ロットの焼入れ材 (850°C 加熱→油焼入れ, 180°C 焼もどし, 硬さ: HRC 61) の結果と共に Fig. 7 に熱起電力-温度曲線をまとめて示した。本図は加熱時の特性を示したものであり、黒セラミックに対する熱起電力の大きさは比較接点温度からの同一加熱上昇温度で比較して過冷オーステナイトが一番小さく、焼なまし材、焼入れ材の順に大きいことがわかる。

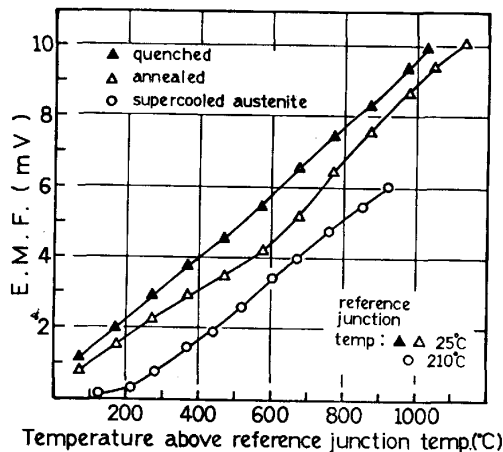


Fig. 7. Comparison of calibration curve in various heat treatments.

熱起電力-温度校正曲線においては加熱時の方がより実切削状態に近いと考えられるので、切削中の熱起電力-切削温度換算はすべて加熱時の結果を用いて行った。

4. 切削実験

4.1 実験方法

前述 Fig. 1 に示した回路構成により、切削中に黒セラミック工具-被削材間に発生する熱起電力を測定し、Fig. 7 の校正曲線から切削温度に換算した。オースカッピングのほか焼なまし材の切削を行い、通常の切削方法との比較を行った。

切削条件は以下に示すように、切削工具形状を一定とし、切削速度、切込み及び送りを変化させ、切削条件が切削温度に及ぼす影響を調べた。

i) 工具

材質：黒セラミック工具

形状：スローアウェイチップ (TNG 334)

[-5, -6, 5, 6, 45, 15, 1.6]

ii) 切削速度： $V=33\sim 310$ m/min

iii) 切込み： $t=0.1\sim 1.3$ mm

iv) 送り： $f=0.1\sim 0.5$ mm/rev

v) 切削状態：乾式、外径丸削り

4.2 実験結果

4.2.1 切削速度の影響

Fig. 8 に切削速度が切削温度に及ぼす影響を示した。図中○はオースカッピング、●は焼なまし材の通常切削の場合である。両者共、切削速度の増大に伴い切削温度が急激に高くなっている。オースカッピングは焼なまし材切削に比べ、切削速度 $V=80$ m/min 以上では約 200°C 切削温度が高く、 $V=310$ m/min では約 1150°C になる。オースカッピングにおいて超硬工具を用いた

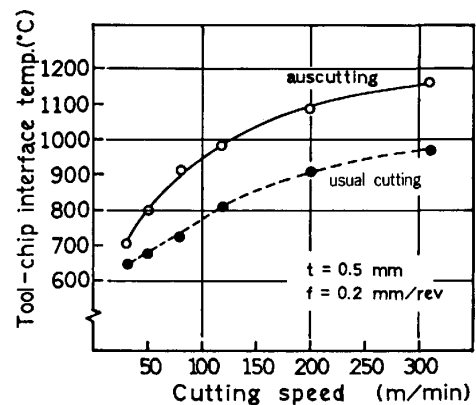


Fig. 8. Variation of cutting temperature in auscutting and usual cutting with cutting speed.

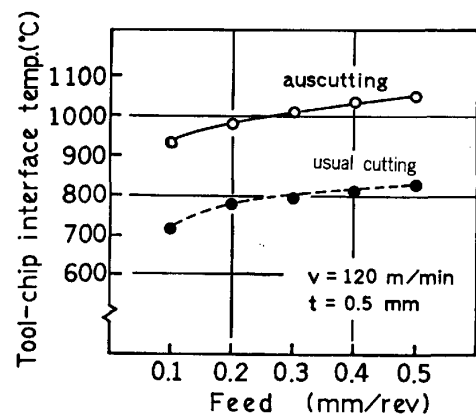


Fig. 9. Variation of cutting temperature in auscutting and usual cutting with feed.

場合に、工具の摩耗が著しく、短寿命であったのは、本結果から判断して通常の切削方法に比べて約 200°C 切削温度が高くなることに起因していると考えられる。

4.2.2 送りの影響

Fig. 9 に送り量の変化が切削温度に及ぼす影響を示した。図の例は $V=120$ m/min, $t=0.5$ mm で $f=0.1\sim 0.5$ mm/rev と変化させた場合であり、オースカッピングの方が焼なまし材切削に比べて約 200°C 高いものの、送りの変化に対してほぼ同様の温度変化を示している。 $f=0.2$ mm/rev が $f=0.4$ mm/rev と2倍になっても切削温度上昇は約 50°C であり、送り量の変化による切削温度の変化は比較的少ない。

4.2.3 切込みの影響

Fig. 10 にオースカッピングにおける切込み量の変化が切削温度に及ぼす影響を示した。切込み量が 0.1 mm ~ 1.3 mm と大きくなっても切削温度はあまり上昇せず、特に $t=0.5$ mm 以上では約 970°C とほとんど変化が認められない。これは切込み量が大きくなると切削抵抗が増大し、工具刃先近傍での発熱量は増大する

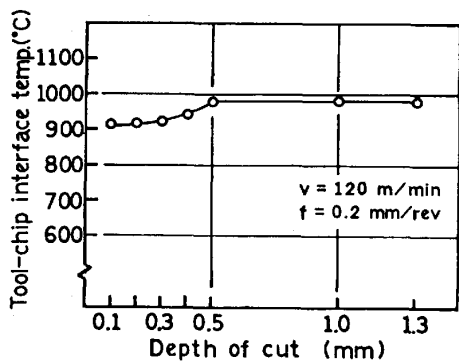


Fig. 10. Variation of cutting temperature in auscutting with depth of cut.

が、それに比例して工具と切りくずの接触面積も増大するため、切削温度としてはほとんど変化がないことを示しており従来の知見と一致する。

オースカッティングでは、切込み及び送りを大きくとり、切削速度を控えるのが、切屑除去能率を高め工具寿命を延ばす切削条件であると考えられる。

5. 切りくず観察結果及び考察

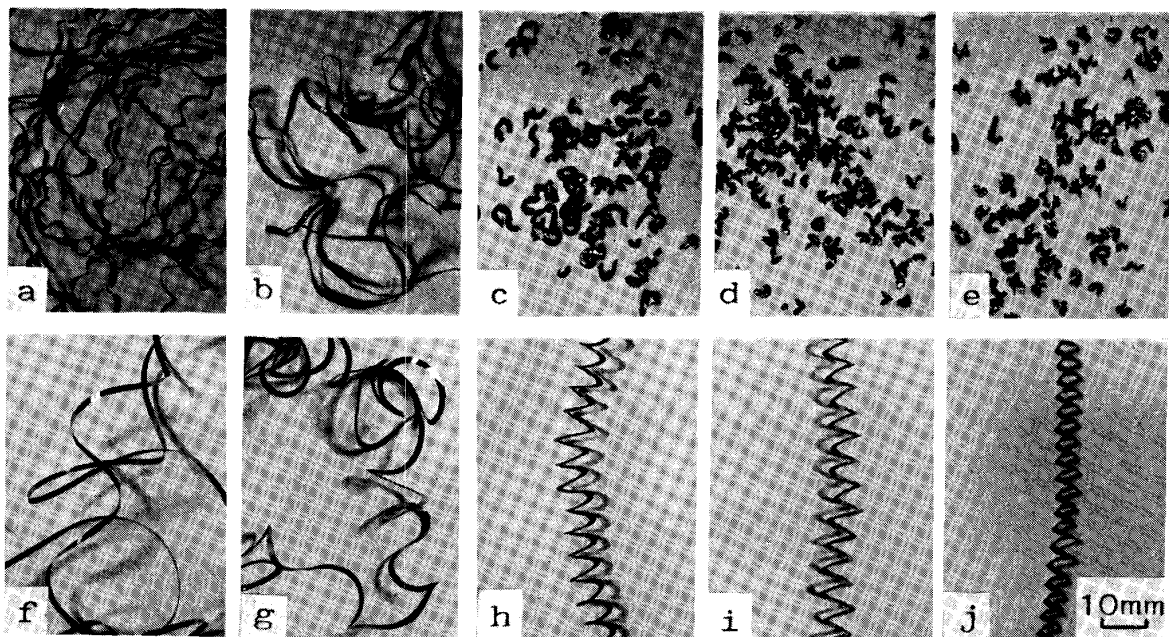
5.1 切削温度が切りくず性状に及ぼす影響

切削性の評価基準の一つに切りくず処理性の良否が挙げられるが、生産ライン作業においては特に切りくず処理性の良いことが重要な条件となる。Photo. 1 に $V=120$ m/min, $t=0.5$ mm で $f=0.1\sim0.5$ mm/rev と変化した場合のオースカッティングと焼なまし材切削の切

りくず生成状況の比較を示した。オースカッティングにおいては $f=0.3$ mm/rev 以上では切りくずが 1~2 mm に短く切れて排出され、また切りくず自体も非常に脆く、切りくず処理性が良いといえる。一方、焼なまし材切削では送りが大きくなるとカール半径が小さくなるものの連続した粘り切りくずとなつている。

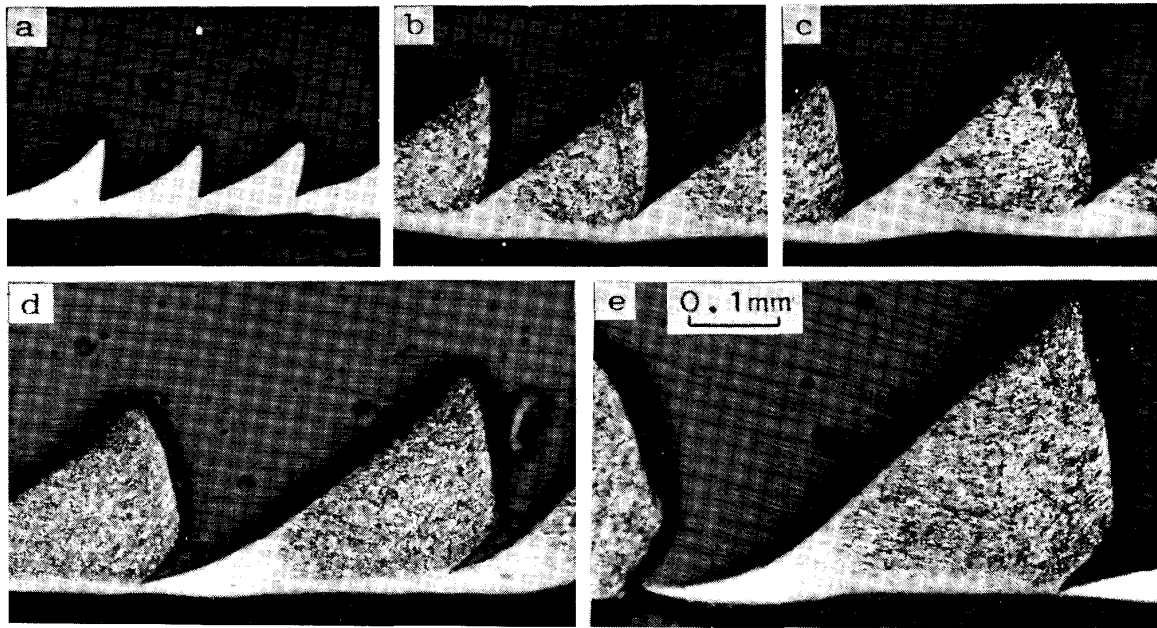
この現象は切りくずの熱処理組織と関連があると考えられ、オースカッティングにおける切りくず断面組織を観察した。Photo. 2 に $V=120$ m/min, $t=0.5$ mm で $f=0.1\sim0.5$ mm/rev と変化した場合の切りくず断面組織を示した。切りくずは周期性のある鋸歯状になっており、また工具接触面側（写真中下方で白く見える側）はマルテンサイト変態により硬さが $HV=720\sim800$ と高い。切削温度測定結果から考えて、この部分は過冷オーステナイトが $900^{\circ}\text{C}\sim1000^{\circ}\text{C}$ の温度域まで再加熱された後、空中で急冷されたものと思われる。一方、中央部は多少黒く見えトルースタイト変態が起こっており、硬さも $HV=500\sim600$ と少し低く、加熱温度が等温変態線図（S 曲線）のノーズ近辺の温度になつていたものと考えられる。

Fig. 11 にオースカッティングにおける切削速度が切りくず断面硬さ分布に及ぼす影響を示した。切削速度の上昇に伴い切りくず断面硬さも高くなつており、切削温度の測定結果と良い相関関係が認められる。すなわち、 $V=50$ m/min 以下の低切削速度域では切削温度が約



auscutting: a) $f=0.1$ b) $f=0.2$ c) $f=0.3$ d) $f=0.4$ e) $f=0.5$
usual cutting: f) $f=0.1$ g) $f=0.2$ h) $f=0.3$ i) $f=0.4$ j) $f=0.5$

Photo. 1. Comparison of chip formations between auscutting and usual cutting under the conditions. ($V=120$ m/min, $t=0.5$ mm, $f=0.1\sim0.5$ mm/rev)



a) $f=0.1$ b) $f=0.2$ c) $f=0.3$ d) $f=0.4$ e) $f=0.5$
 Photo. 2. Cross sections of chips in auscutting under the conditions.
 ($V=120$ m/min, $t=0.5$ mm, $f=0.1-0.5$ mm/rev)

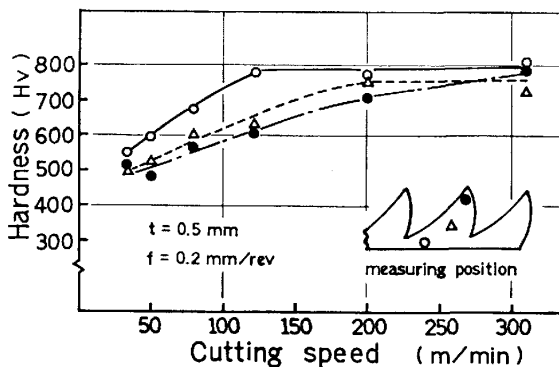


Fig. 11. Influence of cutting speed on hardness distributions of chips.

800°C 以下であるため冷却中に一部トラスタイト変態を起し低硬度となるのに対し, $V=120$ m/min 以上では 1000°C 以上の高温となるため, 冷却により S 曲線のノーズにかかることなく完全にマルテンサイト変態を起し高硬度となる. 従つてオースカッティングにおいては, 切りくずの断面硬さを測定することにより逆に切削温度を推定することも可能と考えられる.

一方, 焼なまし材切削では Photo. 3 に示したように流れ型の切りくず形態を示し, また $V=200$ m/min では切削温度が約 900°C の高温になつているにもかかわらず組織変化が認められない. これは切削中における切りくずの加熱時間が 10^{-3} s 程度と非常に短いために, 焼なまし状態では 900°C になつてもオーステナイト化していないことを示しており, 軸受鋼を急速加熱 ($2 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ °C/s) した場合はオーステナイト化温度が

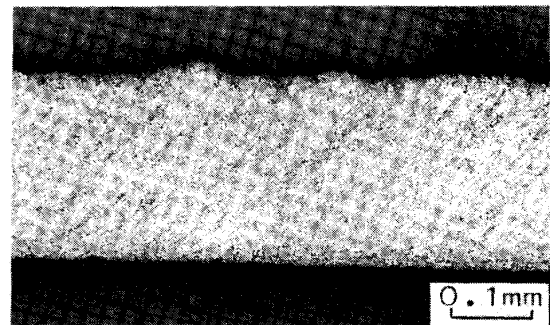


Photo. 3. Cross section of chip in usual cutting of annealed steel under the conditions.
 ($V=200$ m/min, $t=0.5$ mm, $f=0.2$ mm/rev)

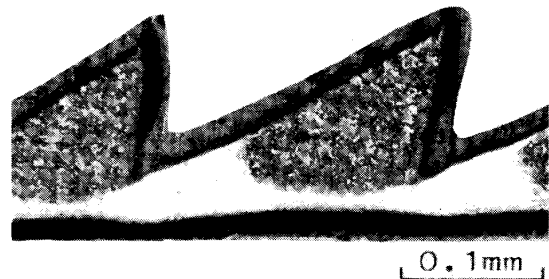


Photo. 4. Cross section of chip in cutting of quench hardened steel under the conditions.
 ($V=80$ m/min, $t=1.0$ mm, $f=0.2$ mm/rev)

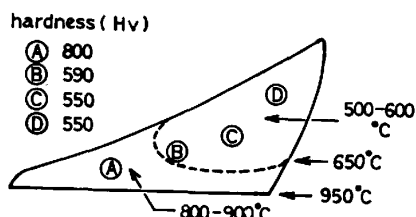


Fig. 12. Temperature and hardness distributions in chip formed by cutting of quench hardened steel.

A₁ 点よりも高温となり完全にオーステナイト化するの
は約 950°C となる実験結果⁵⁾からも推察されるところ
である。

また比較のため、前述の熱起電力校正実験で用いた焼
入れ材を同様に切削した時の切りくず断面組織を Photo.
4 に示した。写真は $V=80$ m/min, $t=1.0$ mm, $f=0.2$
mm/rev の場合であり、切削温度は約 950°C であつた。
焼入れ材の切削切りくずはオースカッピングの場合と
同様に鋸歯状になつており、また工具接触面側には再焼
入れされたマルテンサイトが認められる。軸受鋼の焼入
れ材を急速加熱した場合、約 650°C でオーステナイト
化が完了し再焼入れされるという実験結果⁵⁾ から推定す
ると、Photo. 4 に示した切りくず断面部の温度分布は
Fig. 12 のようになつていふと考えられる。すなわち、
切りくず中央部はマルテンサイトが 500°C~600°C で
高温焼もどしされるため硬さが HV=550 と低下する。
工具接触面側では 650°C 以上の高温になるため、いつ
たんオーステナイト化し、空中で冷却されることにより
マルテンサイトに再焼入れされ、HV=800 と高硬度を
示す。

焼入れ材切削と同様な切りくず形態を示すオースカッ
ピングにおいても、本図に類似した温度分布になつて
いるものと推定され、切りくず中央部は過冷オーステナ
イトが 500°C~600°C の S 曲線のノーズ近辺の温度に加
熱されるため、冷却中にトルースタイト変態が起こるも
のと考えられる。

5.2 過冷オーステナイトの加熱・冷却による組織変化

過冷オーステナイトの加熱・冷却による組織変化状態
をさらに検討するため、対黒セラミック工具の熱起電
力-温度校正実験において加熱した突起部（加熱後空冷）
のマイクロ組織及び硬さ分布を調査した。Fig. 13 に断面
硬さ分布を示した。加熱接点から 6 mm 深さ位置まで
はマルテンサイト変態を起こし高硬度であり、6 mm~
14 mm 深さ位置ではトルースタイト及びベイナイト変
態したために低硬度になつていふ。また 14 mm 以上の
深さ位置では加熱による熱影響がほとんどなかつたため

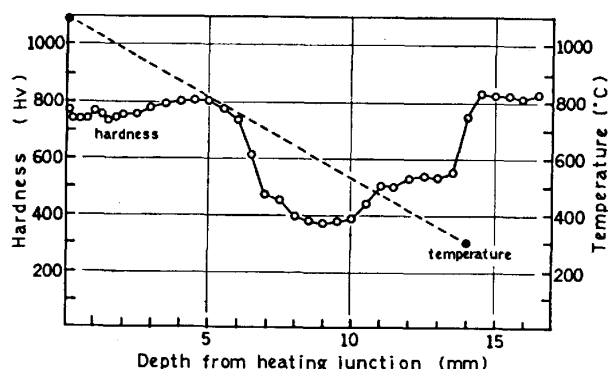


Fig. 13. Hardness distribution at heating junction of supercooled austenite.

に、過冷オーステナイトがそのまま冷却されてマルテン
サイトになつていふ。加熱終了時に約 14 mm 深さ位置
の表面温度を測定した結果約 300°C であり、加熱接点
部の温度 1100°C との間の温度勾配を直線で近似する
と、同図中破線で示したように加熱温度が 300°C~700
°C では S 曲線のノーズ近辺の温度であるため冷却時に
トルースタイト及びベイナイト変態が起こり低硬度にな
る。一方、加熱温度が 800°C 以上あるいは 300°C 以下
では S 曲線のノーズにかかることなく、冷却によりマル
テンサイト変態が起こり高硬度になる。

本結果は、実切削における切削温度測定結果と切りく
ずのマイクロ組織観察結果とはほぼ一致しており、オースカ
ッピングにおける切りくずの組織変化は加熱時間が非
常に短いにもかかわらず、S 曲線における変態挙動に従
うものと考えられる。

6. 結 言

黒セラミック工具の熱起電力特性を明らかにし、工具-
被削材熱電対法によりオースカッピングにおける切削
温度測定を行つた。また切削実験で得られた切りくずを
観察することにより、切削温度が切りくず性状に及ぼす
影響を調べた。

得られたおもな結果は次のとおりである。

1) Al_2O_3 に TiC を約 20% 含有した黒セラミック
工具は導電性を示すため、工具-被削材熱電対法により
切削温度の測定が可能である。

2) SUJ 3 対黒セラミック工具の熱起電力特性は、
SUJ 3 の熱処理状態により異なり、過冷オーステナ
イト<焼なまし<焼入れの順に大きい熱起電力が発生す
る。

3) オースカッピングの切削温度は通常の焼なまし
材切削に比べ、同一切削条件下では約 200°C 高くなり、
 $V=200$ m/min, $t=0.5$ mm, $f=0.2$ mm/rev の時に約

1100°C となる。

4) オースカッピングでは通常切削と同様に切削温度上昇要因としては切削速度の影響が最も大きく、送りや切込みの影響は比較的少ない。

5) オースカッピングにおける切りくずは切削条件によらずすべて周期性のある鋸歯状となり、また切削温度の上昇に伴い切りくず自体も焼入硬化し、脆くなるため切りくず処理性が良い。

6) オースカッピングでは切りくずの断面硬さと切削温度との間に相関関係が認められるので、切りくずの断面硬さ測定を行うことにより切削温度を推定することが可能である。

文 献

- 1) Y. FUJIOKA, H. TANI and H. MURO: Proc. Intern'l Symp. on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel (1977), p. 323 [ISIJ. ASM]
- 2) 藤岡康夫, 室 博: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 404
- 3) たとえば, 田中 博: 精密機械, 39 (1973), p. 917
- 4) K. J. TRIGGER, R. K. CAMPBELL and B. T. CHAO: Trans. ASME, 80 (1958), p. 302
- 5) 室 博, 高橋謙司: ベアリングエンジニア, 20 (1971), p. 2653