

# 超 高 速 切 削

大阪大学工学部 田 中 義 信

## 超高速切削とは

東京オリンピックの年、ウルトラCと言う言葉が流行したが、このウルトラと言う言葉は体操だけでなく、超音波 (Ultrasonic waves) とか、超短波 (Ultra short waves) などのように種々の分野で用いられている。そして、超音波では 1.6KC/s 以上の振動数の音波を指すように、`超` という言葉にはどの分野においても、ある程度明確な基準が存在するようである。

それでは、超高速切削 (Ultra High Speed Cutting) とは、はたしてどの程度以上の高速切削を指すのかと言う疑問が生れてくる。しかし、これに対する明確な定義はいまだに見つけることができない。

このような超高速切削の概念はもともと、1931年、Krupp 社の Salomon 博士の提唱に端を発したもので、博士は Helical cutter を用い最高 16,000m/min までの種々の切削速度の下に切削実験を行なった結果、切削温度は切削速度の上昇とともに上昇するが、切削速度がある値以上になると返って低下する事実を確かめ、切削温度が低下すれば工具寿命が延び、超高速における切削が可能になると考えた。しかしこの温度低下の事実については、温度の測定方法に問題のあることが指摘され、後の実験においてはむしろ、否定的結論に達しているようである。したがって Salomon 博士の `死の谷` 以上での切削を超高速切削と言う考え方はもろくも崩れ去ったのである。

しかし、最近ではこのような切削温度の問題とは異なった見解の下に、材料の高速変形挙動に注目した研究がなされている。すなわちこれは、1940年代に Taylor や von Kármán によって確立された固体内の塑性波の伝播理論に基づくもので、塑性波の伝播速度以上の変形速度で衝撃荷重が与えられれば、材料は着力点近傍で瞬時に破壊すると云う考え方によるもので、切削においても塑性波の伝播速度以上の高速で切削すれば切削抵抗は減少し、切削温度も上昇せず、超高速切削が可能であろうと考えるものである。しかし測定技術の問題等のために、これらに関する実験も比較的少なく、未だに明確な結論を得るに至っていない。

こうした状況の下で、加工物の精度の向上と加工能率

の増大を究極の目的としている我々にとって、これらの可能性を含んだ超高速切削の解明は、きわめて興味ある重要な問題である。

## 高速現象と測定技術

超高速切削機構を究明するには、まず所望の高速を得ることが必要である。そこで我々は比較的簡単な方法として図1に示すように小銃を用いることにした。すなわち被削材を発射体とし、図2のように銃口直前に固定した工具を用いて、発射体の一部を削り取る方法である。

このようにして、第一の問題であった高速度を得ることが可能になった。切削速度は爆薬量と被削材の重量、薬きょうと被削材の締付具合によって異なるが  $V_c = 10,000 \sim 50,000 \text{ m/min}$  の速度を得ることができた。こうして、どうやら超高速域での切削は可能になったが、

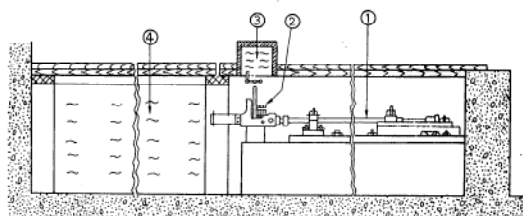


図1 火薬を利用した超高速切削実験装置

- ① 銃 身
- ② バイトホルダー
- ③ 切屑回収部
- ④ 被削材回収部

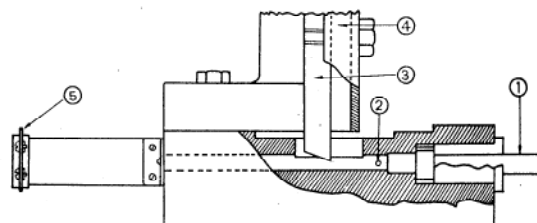


図2 工具および工具ホルダ

- ① 銃 身
- ② トリガー用コンタクター位置
- ③ 工 具
- ④ 切屑回収用バイト押え
- ⑤ ワイヤースクリーン位置

次にこれらの現象に対する測定技術の問題がきわめてやっかいな問題として我々の前に立ち塞がるのである。

たとえば切削抵抗について検討する場合、切削現象の持続時間が数10～数100 $\mu$ sec 程度の切削抵抗を測定するには、少なくとも数 10KC/sec 以上の固有振動数を持つ切削動力計が必要となる。そして最近高い固有振動数を有する加速度計などが発達したとは言え、それらのゲージを取り付けるだけのオーバハングをとると工具の固有振動数が低下し、これを上げるために工具を太くすると感度が下がるなど、まだまだ満足するところまで到達することができない。

一方、高速を得るエネルギー源として爆薬を用いたと云うことで、上のような測定の技術的問題の他に銃口から出る発射ガスの影響も考慮しなければならなくなる。特に発射ガスは銃口から出た瞬間、発射体の約2倍の速度になると云われている。したがってこの発射ガスの切削工具に及ぼす流体力学的影響も見逃がすことのできない問題である。また、高温高圧下で活性化されたガスが切削温度や工具摩耗に多大の影響を及ぼすことも十分考慮しなければならない。

このような問題のある中で、我々はひとまず、切りく

ずの形状や工具の摩耗状態から超高速切削機構を推定する資料を得ることができたが、こうしたきわめて複雑で至短時間の現象を解明する前に、これらの問題を取り除いた現象を作り出し、正しく測定することが必要であることを知った。そこで、高速現象を得る方法と測定技術のかねあいにおいて、材料の変形機構にきわめて興味ある塑性波の伝播速度を、十分その中に含んだ速度域で、しかも機械的に回転体を利用して得られる 1,000～10,000 m/min の切削速度域にまず注目することにした。そして旧式の研削盤を改造して準備したのが図3に示す超高速切削装置である。

これは横軸円テーブル型の研削盤であり、砥石軸に外径 500 $\phi$  の被削材を取り付け、原動機は振動をできるだけ少なくするため、本体と分離し無段変速のものを用いた。そしてほぼ 2,000～8,000 m/min の周速を得ることができた。なお、被削材の偏心荷重による振動を小さくするため、特別にバランスを準備し、回転中における振動を測定しながらバランスをとった。しかもその工具と工作物方向の最大振幅を 3～5 $\mu$  と非常に小さくすることができた。このようにして準備した装置においては少なくとも1秒以上の切削持続時間を得ることができ、従来より用いられている切削動力計でも十分切削力を測定することができるようになった。

### 切削における材料の高速変形

こうして我々は、いままで未知の領域であった 2,000 m/min 以上の切削現象の解明に着手した。切削現象解明の目安として、まず切りくずの観察、切削抵抗の測定等行なったが、切りくずは外観的には何の変りも無く連続型のものであり、切削抵抗も  $V_c=2,000$  m/min 以上ではほとんど一定と云う我々にとっては極めて面白い結果が表われた。しかし高速ハンマや爆発成形等が実用段階に入ろうとする現在、それらよりはるかに高ひずみ速度であると考えられる切削速度域であるため、外観的には変化のない変形機構も、微視的には何らかの特異性のあることを信じ、切りくずをさらに微視的に観察することにした。

こうした考え方に立ち至ったのは、金属材料の変形は転位の移動、すなわちすべりにより行なわれていることであり、これらのすべりはその部分の熱エネルギーにより支配されることなどを考えたからである。こうした非常に重要な要素である熱の問題も、きわめて狭い領域で、しかも高速に通過するせん断領域の温度分布を正確に測定することが、技術的に不可能に近い現在において、これらの温度を理論的に取り扱い、これと密接な関係にあ

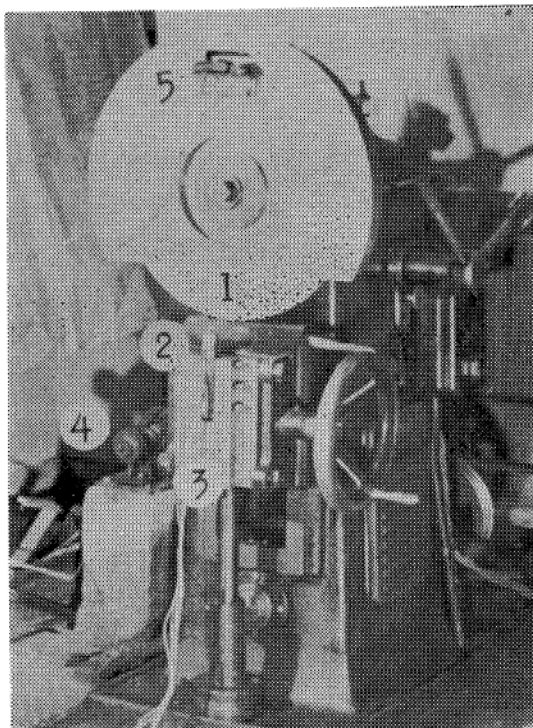


図3 超高速切削装置

- 1) 被削材
- 2) 工具動力計
- 3) 工具ホルダ
- 4) 送り量変換装置
- 5) 回転計

る切りくずのすべり状態やせん断応力から、超高速切削におけるせん断現象を解明するより他に方法がないと考えた。

そこで、まず温度についてみると、もしきわめて低速切削ならば、せん断領域における温度は等温的であるが、高速域では温度分布は急峻となる。たとえば図4のような熱源のモデルを考えると、理論的には図5のようなになる。いま、図6のようなせん断模型を考えると、せん断の引き起こされる部分の温度を計算で求めることができる。図7の実線はこうして求めたせん断面より $d$ だけ前方の温度と切削速度の関係を示すものである。しかし、

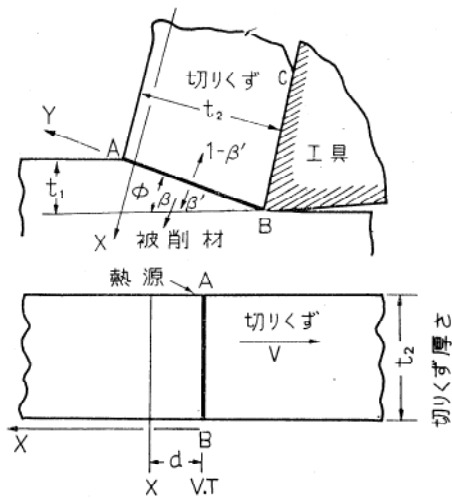


図4 せん断領域における熱源

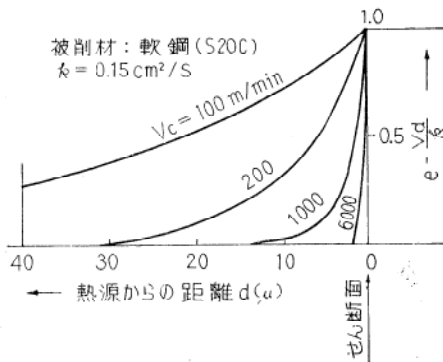


図5 せん断領域の温度分布

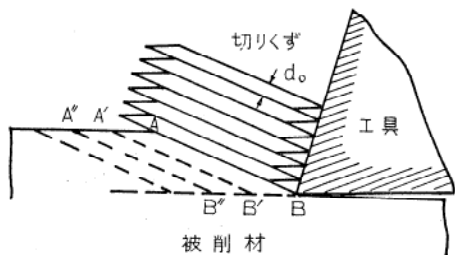


図6 切削模型

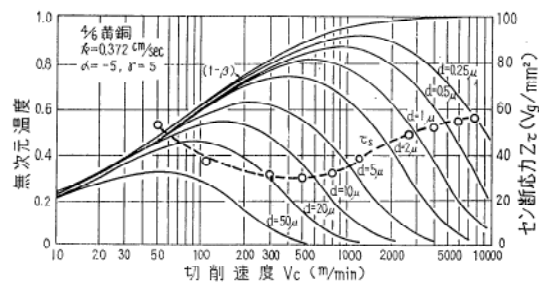


図7 せん断面より任意の距離 $d$ の温度と切削速度、せん断応力

この温度とせん断応力の関係を求める場合、せん断が生じる幅、すなわちすべり片厚さ (glide lamella)  $d_0$  を求める必要があり、そこで実験は切りくず内のすべり線の微視的観察に集中した。

従来、切りくず断面の観察は、単に化学的腐蝕によって組織の流れを観察するに過ぎず、これを用いて間接的にすべりの方向などについて検討していた。しかし、切りくず内のすべりが直接観察できれば、さらに正確に詳しく変形機構を検査することができる。そして我々は、電解研磨と電解腐蝕により、きわめて大きなひずみを受けている切りくず内のすべり線を観察することに成功した。図8が電子顕微鏡の助けを借りて観察した黄銅のすべり片の状態である。これよりすべりは  $0.5 \sim 2.0 \mu$  程度のすべり片厚さですべていることが明らかとなった。

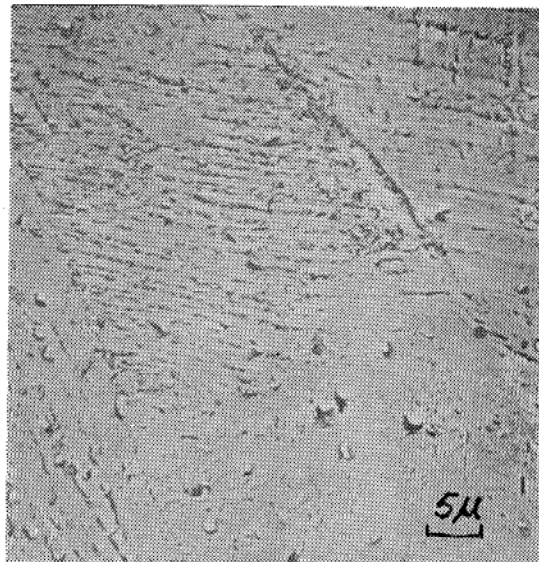


図8 すべり片の電子顕微鏡による観察

この数字を用いて再び図7を見ると、 $d = 0.5 \sim 2.0 \mu$  の温度が最高になる切削速度は  $V_c = 500 \sim 800 \text{ m/min}$  であることがわかった。一方、実験的に求めたせん断応力は点線のようになり、 $V_c = 500 \text{ m/min}$  において最小となっている。すなわちこれより、せん断応力とせん断が

引き起こされる部分の温度との間に密接な関係のあることが明らかとなった。

また、我々が最も注目している超高速切削においてもすべり線の観察から、きわめて特異な現象を明らかにすることができた。すなわち図9のように、すべり線が局部的に集中していることである。外観的な観察においては何の変りつもないように見えた切りくずも、その内部はきわめて大きな変形を受けた部分と、比較的ひずみの少ない結晶粒の形をとどめた部分とからなっている。これは変形が材料内部の最も弱い部分で生じはじめると、その部分の温度が上昇してすべり易くなると言う断熱すべりにより行なわれていることを示すものである。断熱せん断の場合、せん断が生じはじめる時の温度は常温に近く、したがって、せん断の生じはじめる初期の応力はむしろ高いものとなる。

以上をまとめると、せん断領域における温度分布とせん断応力の関係は図10のように説明することができる。すなわち、低速域ではせん断領域は等温的であり、温度も低いためせん断応力はむしろ高いが、高速になるに従いせん断される部分の温度が高くなり、せん断応力は減



図9 切りくず内部の断熱すべり

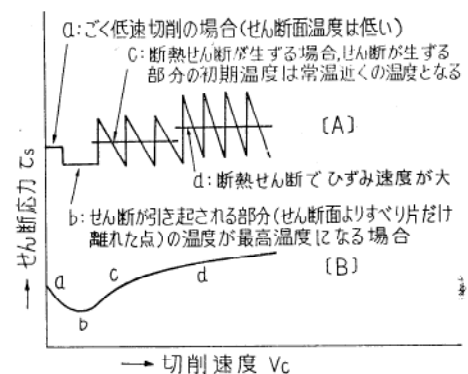


図10 切削速度とせん断応力の関係の説明図

少する。しかし、さらに高速においては断熱せん断となり、初期応力は高く、ひずみ速度の影響も加わって、みかけのせん断応力は大きくなるものと考えられる。

このようにして熱的考え方を入れることによって、これまで全く不明であった超高速切削のせん断機構が、一般の切削とかなり異なっていることを明らかにすることができた。

### む す び

材料の高速変形の解明と切削加工能率の増大と言う大きな夢から始まったこの研究も、いまようやくその第一歩を踏み出すことができたのである。

いまここに立って超高速切削の未来を見つめた時、高速現象の測定技術の問題、超高速を得る方法の問題、あるいは工具材料の開発等まだまだ多くの問題が山積しているが、最近の科学技術の急激な進歩を研究者のたゆまる努力が、これらの問題を解明し、必ずや近き将来において、現在の超高速切削を常用の切削として用いる日が来ることを信じて疑わない。

(22頁より続く)

### 文 献

- 1) 若林：粉末冶金工業会講演概要集，Nov. (1966)，1.
- 2) P. Wiest："Spmposium sur la métallurgie des poudres"，Paris，(1964)，329.
- 3) K. Shoji：Technol. Repts. Osaka Univ.，17，801 (1967).
- 4) 庄司：粉体および粉末冶金，12，22 (1965).
- 5) Höganäs Iron Powder Handbook，(1962)，I，G，40，11.
- 6) 内藤：日本金属学会会報，2，58 (1963).
- 7) S.R. Crooks：Metal Progress，Dec.，68 (1958).
- 8) R.L. Pettibone：Precision Metal Molding，June，35 (1963).
- 9) K. Shoji：Technol. Repts. Osaka Univ.，15，45 (1965).
- 10) P.U. Gummeson：Precision Metal Molding，Oct.，58 (1959).
- 11) 庄司，山田：鉄と鋼，50，2345(1964).
- 12) A.J. Zino et al.：Metal Progress，Apr.，88 (1963).
- 13) 藤井，林，渡辺，保田：名工試報告，7，5，33 (1958).
- 14) 川北，桂，古川：住友電気，92，89 (1966).
- 15) 庄司，山田：粉体および粉末冶金，14，181 (1966).
- 16) S.I. Hulthen："Powder Metallurgy"，Interscience，(1961)，631.
- 17) H. Weiss：Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen，Nr. 799 (1960).
- 18) F.L. Spangler and E.M. Lackey：Iron Age，Aug. 1，98 (1957).
- 19) Höganäs Iron Powder Handbook，(1962)，I，G，50，7.
- 20) 上田，新中：粉体粉末冶金協会秋季講演大会概要集，(1966)，14.