1 200 m/s に及ぶ超高速切削における 表面創成 (第 1 報)*

——超高速実験装置の試作と若干の実験——

貴 志 浩 三** 江 田 弘** 上 野 秀 雄**

Surface Generation at Super High Speed
Cutting up to 1200 m/s (1st Report)
—Trial Manufactured Apparatus and Some
Experiment of Super High Speed Cutting—

Kozo KISHI, Hiroshi EDA
and Hideo UENO

This paper deals with generation of the machined surface for the super high speed cutting of aluminium alloy and brass in orthogonal cutting in the high speed range, i.e. 100–1200 m/s. For example, extension of the cutting plastic zone can be decreased by increasing cutting speed V to a value greater than the propagation speed of plastic strain v_{ϵ_p} of the materials to be cut. A

cutting experiment, at speeds up to 1200 m/s, was carried out for reduction of the machined layer. The results are as follows: (1) An experimental apparatus, which enables stable cutting up to 1200 m/s, was developed. (2) Comparing cutting at 1 m/s with that at 1200 m/s, residual stress and hardness of the machined layer decreased by 90–95% and 85–90% respectively, and plastic flow was almost negligible. (3) Moreover, the distribution depth of both hardness and plastic flow decreased by more than 90%.

Key words: surface generation, super high speed cutting, aluminium alloy, brass, residual stress, hardness, plastic flow, manufactured apparatus.

1. ま え が き

切削加工変質層は、ほとんどが塑性変形過程を通して生成される。ここでもしも切削加工が弾性変形後、塑性変形過程を通らずに、直接金属の分離作業に至る方法があるとすれば加工層の生成はさほど問題になることはない。しかしそのような方法をとること自体不可能であるから、結局は、塑性ひずみの減少を目的とした加工法をとらざるをえない。著者は加工層の軽減方法としてこれまでいくつかの技術的アプローチを試みているが、いずれの場合にも結果的には塑性変形の減少をもたらすことにより改善する方法であった¹⁾。ここで取り上げた方法も全くこの考えに沿って行った例である。つまり被削材のもつ塑性ひずみ伝ば速度を上回り、より高速度で切削を行えば、塑性ひずみが切削領域に十分に拡大されないうちに工具が通過することになるから、仮に塑性ひずみ伝ば速度を上回るような切削速度をとるようになれば、次第に衝撃破壊を伴った時に生ずるような破面、つまりぜい性的な素質に富む切削表面が得られることになるのではないかと考えられる。また工具-被削材の接触時間の短縮は、切削熱の切削領域への供給時間を減じる

ことになるから、熱被害の改善も同時に見込まれる。本報は、切削速度 V と塑性ひずみの伝ば速度 v_{ϵ_p} の速度差 ΔV_R を増加せることによって塑性域成長の減少をねらったものである。つまり超高速切削実施による加工層の軽減を目論んだ。

2. 超高速切削による加工層の軽減の基本理念

一般に塑性ひずみの伝ば速度 v_{ϵ_p} は

$$v_{\epsilon_p} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}} \quad (1)$$

で与えられる²⁾。ただし、 ρ : 密度、 σ : 応力、 ϵ : ひずみである。図 1 に示す σ - ϵ 線図において、仮に応力 σ_s が作用しているとすれば、曲線 I の被削材は $\overline{AD}$ の塑性ひずみ $\epsilon_{\overline{AD}}$ を生じ、同様に曲線 II, III の場合は $\epsilon_{\overline{AC}}$, $\epsilon_{\overline{AB}}$ となるが、曲線 IV は塑性ひずみなしとなる。つまり塑性ひずみが生じないためには式 (1) において $\partial \sigma / \partial \epsilon = H' = E$ 以上の条件をとればよいことになる。仮に、本実験用被削材 99.97% Al について曲線 I, II, III の点 B, C, D での接線が、 $(\partial \sigma / \partial \epsilon)_I = 0.72$, $(\partial \sigma / \partial \epsilon)_{II} = 7.2$, $(\partial \sigma / \partial \epsilon)_{III} = 72$ で与えられるとすれば、 $\epsilon_{\overline{AD}}$, $\epsilon_{\overline{AC}}$, $\epsilon_{\overline{AB}}$ より塑性ひずみを減少させるには、見掛け上 $v_I = 51.9$ m/s, $v_{II} = 164$ m/s, $v_{III} = 519$ m/s より早く高速変形させる必要がある。ただし $\rho = 2.75 \times 10^{-10}$ kg·s²/mm⁴ である。この値はあくまでも見掛け上の値で、実際にはこの条件に即し

* 原稿受付 昭和 54 年 12 月 19 日。昭和 53 年度 精機学会 春季大会学術講演会 (昭和 53 年 4 月 2 日) に発表。

** 正 会 員 宇都宮大学工学部 (宇都宮市石井町 2753)

図1 σ - ϵ 線 図

た動的 σ - ϵ 線図から $\partial\sigma/\partial\epsilon$ を得るべきである。つまり高速変形領域では加工硬化がより強く進んでおり、静的 σ - ϵ 線図から得た H' に比べより大きな値となっているから、その変形場で v_{cr} を越すためにはより高速な v_{cr} を与える必要がある。しかしその変形場の状態は既に塑性ひずみがより出にくい被削材に見掛け上変わっているから、材料としては曲線IからIIの方に移行したことになる。つまり移行した塑性ひずみ分だけがその速度における塑性ひずみの減少となって現れる。このような現象の存在は、von Kármánが丸棒の高速変形を衝撃的な速度で行った場合に認めている³⁾。彼は引張変形破壊実験において、破断部分でのくびれ生成が、衝撃点近傍に限られて現れることを確かめ、かつくびれに伴う伸び、絞りは速度上昇と共に減少することも見出ししている。本実験の99.97% Al, 0材の場合、ぜい性的素質(塑性ひずみの減少)が現れるのは、 $v_{cr}=51.9$ m/sからと算定される。von Kármánらの説は塑性加工の分野における理論の説明であるが、田中ら⁴⁾、山本ら⁵⁾は切削速度700 m/sと200 m/sまでの範囲について切削機構に対する若干の検討を加えた。その結果、切削速度 V の上昇に伴いせん断角がある条件で 50° に達することや V 増大に伴い切削抵抗が増加傾向をとることなどの知見を得ている。本研究について超高速切削⁶⁾の物理的定義は静的 σ - ϵ 線図から得られた塑性ひずみ伝ば速度以上での切削加工とする。

3. 超高速切削装置の試作と実験方法

高速度を得る方法にはいろいろあるが⁶⁾、多くの場合所定速度への到達時間がかかるために、本実験では固形燃料を用い爆発エネルギーの大きさをかりて瞬時に定速度を得る装置を第1に考えた。この方法は第2の現在進行中の10 000 m/sの速度を得る装置(ロケット)にも適用できるからである。第2の方法の場合データの互換

図2 被削材運航用ロケット

性を得る目的から $V=800$ m/sについて重複して実験を行い、今回の場合この方式でははかに1 000, 1 200 m/sのみ実験した。なお第2の方法は図2に示すロケットモータ内でダブルベース型の燃料を燃焼させ、同時に第1の方式を併用する。その際ロケットでの切削速度は、ノズルのスロート部 A_x と出口部 A_y の断面積をえることにより最大速度が求まるから、燃料の燃焼速度 r_b があらかじめ知れば以下の式からロケットのみによるマッハ(Mach)数 M_v が求まる。

$$M_v = M_x \cdot \frac{A_x}{A_y} \times \sqrt{\left[\frac{(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_v^2)}{(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_x^2)} \right]^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (2)$$

ただし、 $M_x=1$ 、比熱比 $\gamma=1.23$ とし、熱エネルギーへの変換は断熱膨張過程にあるとする。

ロケットスカート部の設計は、 $M_v=0.8, 1.5, 2, 3$ の時 A_y/A_x は順に0.4, 1.19, 1.77, 5.16で、直径 $D_y(D_x)$ は同順に $\phi 12.2(12)$, $\phi 13(12)$, $\phi 16(12)$, $\phi 27(12)$ の寸法形状に設計された。

今回(第1の方法)の実験装置の概略は、図3に示ようになる。被削材(外径 $\phi 11.90 \pm 0.01$, 長さ150 mmの飛しょう体)は図4に示す高速発射機構(チャンバ)出口に設置され、適当な点火剤(カートリッジ: 黒色火薬)を電気着火により固形燃料(発射薬107 BAP用のシングルベース, 4~10個)が爆発し、そのエネルギーを受けて、被削材は飛しょう体誘導管路(内径 $\phi 12.00$, 材質SUS 304)壁面との金属接触なしに、油膜に支持されたかたちで滑走(摩擦係数 $\mu_d=0.001$, 被削材のスピンなし)する。また被削材は誘導管路出口から進行方向に20 mm

図3 実験装置の概略

離れた距離に設定されている工具 (SKH 4 A) によって切削され、切込みはハイトゲージによって切削ごとに調整される。次に切削速度は、切削直後の定距離はなれて平行に置かれた2本の鉛筆の芯の破断 (電圧印加して回路作成) の時間差を計測することによって、またその直後にある2基のルミラインの光路を飛ばしう体が通過して遮断した時の時間差を読みとる。これらはともに電子計算機にオンラインとなっており、即座に速度が算出

図4 高速発射機構

図5 被削材の運動

される。また切削挙動は高速度カメラ (コントロール室から遠隔操作) でたえず監視されビデオテープに記録されるから、これからも切削速度は知られる。このような実験装置に至る以前に多方面にわたり詳細に検討した。特に安全性の面に綿密な配慮をして設計された。その第1は爆発エネルギーと切削速度の関係から爆発容器の圧力値の算定である。そこで図3の装置における被削材の運動は図5に示すように書けるから、滑走路 (ランチャ) 内の任意の点 x における圧力を P_x とすれば、ニュートンの第2法則から

$$\frac{W}{g} \cdot \frac{dV}{dt} = P_x \cdot \frac{\pi}{4} D^2 - F \quad (3)$$

の運動方程式が与えられる。ただし W は被削材重量である。被削材の滑走は、油膜で浮上しているから、推力 $P_x \cdot \frac{\pi}{4} D^2$ に比べれば、管路内滑走によって生ずる摩擦力 F は無視でき、 $F \approx 0$ と書ける。そこで滑走速度 $V = dx/dt$ として、走行距離 x は次式で与えられる。

$$x = \int V dt \quad (4)$$

また爆発容器内の固形燃料の燃焼は、断熱膨張過程をとるとみなせるから、

$$P_x (U_0 + \frac{\pi}{4} D^2 x)^\gamma = P_0 U_0^\gamma \quad (5)$$

の断熱膨張式を得る。ただし、 U_0 は高速発射機構部内の容積 (630 cm³)、 $\gamma = c_p$ (定圧比熱)/ c_v (定積比熱) = 1.23 である。

式 (3), (4), (5) より被削材の滑走速度 V は

$$V = \int \frac{P_x \cdot \frac{\pi}{4} D^2}{\frac{W}{g}} dt = \int K \cdot P_x dt \quad (6)$$

ただし P_x は、

$$P_x = \frac{P_0 U_0^{1.23}}{(U_0 + \frac{\pi}{4} D^2 x)^{1.23}} \quad (7)$$

である。そこで式 (6), (7) の計算は電子計算機によって行うが、Runge-Kutta-Gill 法によって解を得る。計算手順は、 t を順次変え、適当な位置 x で計測 (電磁型圧力計: 熱被害防止のため常時冷却) されている圧力 P_x を代入し V を求める。計算結果は図6に示す通りである。ただし図中 n は固形燃料の価数を表す。また式 (6) の P_0 は固形燃料の種類によって決定され、その爆発圧力 P_0 は

$$P_0 = 2A\sigma n \quad (8)$$

図6 被削材の速度

である。ただし、 A : 固形燃料断面積 (式(7)の2は表と裏) である。計算された速度は、 n 増加により容易に被削材 Al の塑性ひずみ伝ば速度を越えることができる。ただし切削点までの走行距離は 4000 mm である。以上のような仕組みで実験を行うが、その時の計測システムは図7に示す通りとなる。実験は秒読み開始前に一度導通試験を行い各計器の作動状況をチェックし、本番に入る。そしてカートリッジ点火3s前に計器は作動開始する。

本実験で技術的に最も問題となったのは、図4に示した爆発容器の設計である。第1の気密性に関しては、二つの円筒容器を特殊のこの歯形ねじによって密閉できるように締結した。第2は点火薬がカートリッジに結線してあるため導火線孔や被削材と誘導管路のすきまがある

が、これも特殊な方法により漏えい防止がなされた。次に試作された超高速実験装置の主要部を図8に示す。図中(a)は高速発射機構部、(b)は切削作業部、(c)は被削材回収部を示す。またこの実験方法によるデータの信頼性を知るために、従来の切削方式との比較を一部低速域 ($V=1\sim 280$ m/s) において重複させて行った。図9はその試作装置を示す。この方式は外径 1500 (切削幅 2 mm, 最大切削速度 280 m/s) まで切削可能で、切込みは縦フライス盤テーブルの横送りを利用した突切り (準2次元) 切削である。被削材は JIS 1100 Al を用いたが、比較のために純 Pb と 7/3 黄銅も供与した。超高速切削は、工具 SKH 4 A, 前すくい角 $\alpha=0^\circ$, 10° , 前逃げ角 $\gamma=5^\circ$, 切込み d は 0.3 と 0.6 mm の乾式2次元切削を行った。

4. 実験結果

4.1 加工層の残留応力

一般に加工層の残留応力は切削速度の上昇と共に増大するが、この変化もある速度(アルミニウムの場合約 500 m/min) で飽和状態に達する。いま 慣用切削速度 (約 500 m/min 以下) のうち、 $V=1$ m/s の値を用い、超高速切削での値と比較すると図10に示すようになる。 $V=1$ m/s に比べると、 $V=250\sim 300$ m/s の時の切削表面の残留応力は約 75% 程度減少する。さらに高速となり $V=700\sim 800$ m/s に至ると約 90~95% も減少し、切削表面はほとんど無ひずみに近い状態となる。また残留応

図7 超高速切削の計測システム

(a) 高速発射機構部

(b) 切削加工部

(c) 切りくず・被削材回収部

図8 超高速切削実験主要部

力分布は $V=1$ m/s から 200 m/s および 800 m/s と高速になるにつれて、分布深さと変動値には幾分の減少が認められるが、切削表面の残留応力の減少率に比べるとかなり少ない。

4.2 加工層の硬さ

図11は、切削表面からの硬さ分布と素地の硬さ H_v に対する硬さの増加率 ΔH_v を切削速度 V に対して示す。加工硬化層の厚さは $V=1\sim5$ m/s のとき約 $100\sim150\ \mu\text{m}$ となるが、 $V=100\sim200$ m/s になるとその約 $1/3$ 程度になり、 $V=700\sim950$ m/s ではほとんど認められない程度に減少する。硬さは切削表面で最大となるが、その増加率 $\Delta H_v/H_v$ をみると、 $V=1\sim5$ m/s の時の値約 0.8、

1: 被削材, 2: 工具, 3: 工具動力計, 4: 被削材送り用テーブル, 5: 被削材回転主軸, 6: 変速用モータ

図9 $V=1\sim230$ m/s 切削実験装置

図10 超高速切削加工層の残留応力

$V=50\sim100$ m/s では約 0.2 となり、前者に比べ約 75% の減少となる。このように V が増加するにつれて加工硬化層は著しく軽減される。

4.3 加工層の組織

加工層組織の塑性流動は、切削表面からの深さ l_a とその点での切削方向への流動量 l_f を知ると有効ひずみ $\bar{\epsilon}$ は

$$\bar{\epsilon} = 1/\sqrt{3} \cdot l_f / l_a \quad (9)$$

と表される。図12は、実測から l_f, l_a を求め $\bar{\epsilon}$ を V に対して整理した結果を示す。 V の増加に伴い、切削方向への組織の流れは著しい減少を示すと同時に、流動が次第

図11 超高速切削加工層の硬さ

に切削面表皮に限られてくることがわかる。加工層の残留応力や硬さの分布深さに比べると全体的に浅い深さとなるが、これは顕微鏡による塑性流動の識別能力が低いためである。しかし相対的な問題としては、 V 増加による減少傾向は前者と同様であることがわかる。

4.4 ロケット方式による超高速切削

切削は、図2に示した円筒形の被削材を同図に示すようにはめ込み、一体化して行った。この方式で切削速度 $V=10\,000$ m/s まで可能であるが、ここでは安全性の面から $V=800, 1\,000, 1\,200$ m/s の3点にとどめた。まず加工層の残留応力、硬さおよび組織について以下順に示

す。切削表面の残留応力 σ_R は、 $V=800$ m/s の時 $0.2 \sim 0.5$ kg/mm², $V=1\,000$ および $1\,200$ m/s の時にもほぼ同じような値を示した。次に硬さの増加率 $\Delta H_v/H_v$ は切削表面において、 $V=800$ m/s の時 $0.17 \sim 0.20$, $V=1\,000$ の時 $0.15 \sim 0.18$, さらに $V=1\,200$ m/s と大となると $0.10 \sim 0.17$ となり、次第に減少していく。次に加工層組織の塑性流動は、 $V=300$ m/s あたりから飽和状態に達し、 $V=1\,000$ および $1\,200$ m/s では200倍の顕微鏡観察ではほとんど認められない程度に減少する。

5. 結果に対する若干の考察

超高速切削における加工層の残留応力、硬さおよび組織の塑性流動は V の増加によっていずれも減少する。この事実は切削場の材料が、図1において述べたような動的挙動をとることがまず考えられる。つまり切削場に素材が入るや否や V 増加により静的 $\partial\sigma/\partial\varepsilon = H'$ 値が増加し、図1で述べた $\varepsilon_{AB} \rightarrow \varepsilon_{AC} \rightarrow \varepsilon_{AB}$ が生じるような環境にさらされることになる。すなわち2章において予測した結果が得られたと解釈される。この結果に対する綿密な検証は次報にて行うが、とりあえずこの結果に対する一つの説得のある事例を示すと、 V 増加により、 $V=250 \sim 300$ m/s 付近から切削表面に無数の微小き裂の生成が認められることである。一般に塑性的素質に富む材料の切削面あるいは破壊面は、粘着流動した時に生ずる凹凸の少ない平滑面あるいは延性破壊時に現れるディンプル生成を伴う場合が多い。したがって切削面のき裂生成は、一時期にしる被削材の H' が増加し、よりぜい性的な状態におかれた結果生じたものとみなされる。つまり V 増

図12 超高速切削加工層の塑性ひずみ

加による切削は、塑性ひずみ先行形によって生ずる時の残留ひずみを伴う切削表面創成から、き裂先行形によって生ずる時の残存き裂生成を伴う切削面創成に次第に移行していていることが示されたと考察される。

6. 結 言

切削速度 $V=1\sim 1200$ m/s の範囲における切削装置の試作と若干の実験を行った結果つぎに示すような結果が得られた。

- (1) 切削速度 1 200 m/s に達する範囲で、安定な切削加工ができる装置が試作された。
- (2) 切削速度 V が 1 m/s から 1 200 m/s になると、加工層の残留応力、硬さおよび塑性流動は、切削表面において同順に 90~95%, 85~90% および流動は無視できるほどに減少する。
- (3) 切削速度 $V=1$ m/s から 1 200 m/s に増加した時、加工層の残留応力は、応力値については著しく減少するが、分布深さの減少は余り認められなかった。
- (4) 切削速度 $V=1$ m/s から 1 200 m/s に増大した時に、加工層の硬さと塑性流動の分布深さは、約 90% 以上の減少が認められた。
- (5) 切削速度の上昇は、被削材を一時的にもぜい化したような状態にして切削した時のような切削表面の痕跡を示す。

終わりに、本実験の遂行に当たり、日産自動車(株)、宇宙開発事業団、栃木富士産業(株)から得た御協力、ならびに実験装置は「音速滑走体」(名城大学元学長小沢久之丞教授)の示唆にあることを記し、厚く御礼を申し上げる。また熱心の実験に当たられた大学院生船山秀一君(現鶴岡工高)、学生薄猛君(現小松フォークリフト(株))、渡辺忠雄君(現日立化成(株))に感謝致します。なお本研究の一部は軽金属奨学会の研究資金によって行ったことを記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) K. Kishi and H. Eda: The Formation of the Surface Layer in the Conventional Machining Process and Reduction of Them, Proc. 1st ICPE, Part II, Tokyo, (1974) 102.
- 2) N. Cristesou(黒崎永治訳): 衝撃塑性学, コロナ社(1969) 50.
- 3) T. von Kármán and P. Duwez: The Propagation of Plastic Deformation in Solids. J. Appl. Phys., **21**, 10, (1950) 987.
- 4) 田中義信, 津和秀夫, 角園時美: 超高速切削に関する研究(第1報), 精密機械, **30**, 8 (1964) 637.
- 5) 山本 明, 中村 示, 神田元貞: 超高速切削における切削機構に関する研究(第1, 2報), 精密機械, **36**, 10 (1973) 663, **37**, 2 (1971) 138.
- 6) 日刊工業新聞: 切削加工技術便覧(改訂版), 日刊工業新聞社(1967) 542.

情 報

(p. 1466 より続く)

〔第3章〕 極限・材料科学技術の総合的研究開発指針では超高压・材料科学技術, 極低温・材料科学技術を中心に重要研究開発課題を摘出, 具体的な研究方を明示している。それによると超高压・材料科学技術では材料開発課題として, ① 衝撃波による超高压粉体加工技術, ② 軽元素超硬質高伝熱材料, ③ 新超電導材料, ④ 機能性新材料の単結晶育成技術の研究開発を, また物質探索に関する課題として, ① 新規物質の探索とその物性, ② 共有性結晶の金属化状態とその特性, ③ 分子性結晶の金属化, ④ 超高压下における有機結晶の金属化, 超電導体化, ⑤ 軽元素物質の超高密度エネルギー状態に関する研究項目をあげている。

一方, 極低温・材料科学技術の開発課題では, ① 高臨界温度超電導材料の実用化, ② 可撓性に富む高性能超電導線材, ③ 強磁界試験用超電導マグネット, ④ 新超電導物質, ⑤ 超電導素子, ⑥ 極低温用構造材料の研究開発の必要性をあげ, そのための技術として, 冷凍冷却技術試験装置の設置, 極低温伝熱技術, 真空断熱技術, 磁気冷却法が当面する開発課題としている。

さらに極低温利用の応用技術としては, 超電導レンズ

電子顕微鏡, 超電導推進船などがあるという。

そのほか, 極高真空・材料科学技術では, 材料合成用極高真空装置, 超高温・材料科学技術では超高温点物質の高温特性評価, 超強磁界発生技術では大型強磁界発生装置の研究開発が今後, 大いに取り組んでいくべき課題として重視している。

また, これら重要研究開発課題を推進していくにあたっての考え方として, 極限・材料科学技術は今後, 技術開発の展開に重要な役割を果たす先導的基盤の科学技術でありながら, 現在, 欧米先進国に比べてかなり遅れをとっていることを改めて指摘している。

その原因として民間主導で進められてきたわが国科学技術の中で, 極限・材料科学技術分野は, ① 市場規模が小さかったこと, ② リスクが大きく大規模プロジェクトとして独立させることが困難だったこと, ③ 研究開発の実施にあたって大型装置の開発, 設置が前提となっていることをあげ, 今後, 研究開発にあたっては国が中心となり, 民間の活力を生かすとともに, 大学などの基礎研究との連携によって推進していくべきであると強調している。(服部 敏夫)