超高速切削に関する研究 (第 1 報)*

田中 義信** 津和 秀夫** 角園 睦美***

Study on Ultra High Speed Machining (Report 1)

Yoshinobu TANAKA, Hideo TSUWA, Mutsumi SUMIZONO

In this paper, the experimental results of ultra high speed machining is reported. Cutting velocities are reached to 200—700 m/s. We are used a Cal. 30 gun tube (removed rifle) for the purpose of realising these ultra high speeds.

Experimental apparatus are composed of a projectile recovery device, a tool holder and a projectile (specimen) firing device. Main cutting forces are measured by a tool dynamometer (semiconductor strain gages are used). The deformed layer under finished surface is investigated by the etch-pit method.

As the results, we found out that cutting mechanism is the shearing. There are marked features of chip shapes; width of chips are widened, length of chips are almost similar to length of cut. There are also some characteristic features on tool wear and finished surface.

結 言

本報告の超高速切削とは銃砲を使用して約 200~700 m/sec の切削速度で切削したものである。

従来切削速度の上昇は加工能率や仕上面の性質の向上に関連して追求されてきたが、これらはおもに工作機械や工具材料の発達にともない漸進的に切削速度を高めてきたものであった。

一方 Dr. Salomon が提唱した「死の谷」の存在説¹⁾に始まる超高速切削が注目され、この説により飛躍的に切削速度を高めた場合の切削の可能性が示された。その後、1940年ころから衝撃荷重下における材料の変形、あるいは破壊の速度依存性に関する基礎研究が行なわれてきたが、とくに超高速切削に対し最も示唆を与えたのは衝撃変形抵抗と衝撃速度の間で重要な関係がある「限界衝撃速度」の存在である。

限界衝撃速度を予想したのは Von. Karman²⁾ らであり、Clark³⁾ は各種材料でその値を実験的に求めた。この理論を切削に応用した場合、限界衝撃速度以上の速度で切削すると破壊機構の変化にともない切削機構が変化し、慣用切削で難削材といわれるものも易削材となりうることが予想される。

1958年に Lockheed 社⁴⁾ では難削材の加工能率の間

題の解決策として銃砲を用いた切削実験を行ない、音速程度での切削の可能性を示した。わが国でも同じような実験でおもに切削力を研究した田中、岩本⁵⁾ の報告や切りくずの形態について研究した笠原⁶⁾ の報告がある。

これらの研究報告により逐次超高速切削の機構が解明される過程にあるが、なお多角的に実験事実を積み重ねて行くことが必要である。われわれもその一環として研究した結果を報告する。本文中慣用切削とあるのは工作機械を用いて切削したものであると了解していただきたい。

1. 実験装置

超高速をうるため、基本的には L 社と同じく火薬の爆發力を利用した。実験装置は被削材射出部、バイトホルダー部、被削材回収部の 3 部分に大別できる。

図 1 に装置 (回収部は省略した) を示す。これらは基礎上にアンカーボルトで固定されている。射出部は口径 0.3" 小銃を用いた。二次元切削を行なうため、銃腔は腔せんを除き平滑にした。したがって射出された被削材は非回転直進運動をして、ホルダー部に設置されたバイトで削られた後、回収部に突入し停止する。

バイトホルダーにバイト ($\alpha=0^\circ$, $\gamma=5^\circ$, $3/8"$ 角, 平バイト, 材質: SKH-4, SK-2 の兩種) を水平にとりつけて固定する。切れ刃と銃口間の距離は 20 mm である。切込みはホルダー側方に固定されているマイクロメーターで行なう。切りくず回収装置は円筒状容器内に綿

* 昭和38年度精機学会関西地方講演会で発表

** 正会員 大阪大学工学部

*** 陸自武器学校

1. 被削材発射装置 2. 銃身 3. トリガ・コンタクト 4. バイト・ホルダー 5. 切りくず回収部 6. ワイヤ・スクリーン

図 1 発射装置とバイト・ホルダー

を詰めたもので、ホルダー側方に固定されている。

被削材回収部は長さ約 1.5m の長方体容器にウエスを密に詰めてあり、突入した被削材を無傷で停止させ回収できる。

被削材は 3 種類の材料 (65/35 α 黄銅, アルミニウム, 快削黄銅) を用いた。65/35 α 黄銅 (以下 α 黄銅と略記する) は慣用切削で連続形の切りくずを排出し、構成刃先は発生せず良好な仕上面が得られる。アルミニウムは軽量であるから本実験では切削速度範囲を大きくとることができる。慣用切削では連続形の切りくずを排出するが、構成刃先が発生しやすく比較的仕上面は悪い。快削黄銅は慣用切削では含有する鉛がチップブレイカの役割をして、切りくずはきわめて小さく丸まって折れる。冷間で成型されているため上記 2 種類の材料に比較して硬く脆性質である。

図 2 に被削材の形状、寸法を示す。切削速度を変化させるために発射量と被削材重量を変化させた。

図 3 は切削速度測定系の説明図である。点線系は切りくずの流出速度を測定する場合に実線系に組入れる。いずれも射出物がワイヤスクリーンを破断した場合にシンクロスコープのブラウン管面の単一掃引波形に信号があらわれ、既知の掃引速度から射出物の平均速度が算出できる。この場合バイトをトリガーコンタクトとワイヤスクリーン間に設置すれば平均切削速度、あるいはは

上: 被削材を薬きょうに取りつけた場合
被削材の形状 直径: 8.1 mm, 長さ: 50, 75, 100 mm

図 2 被削材の形状

点線系を組入れると同時に平均切りくず流出速度も求められる。

図 4 は実線系に点線系を組入れた場合に得られた掃引波形の一例である。それぞれのワイヤスクリーンは径 0.3 mm のエナメル被覆銅線で構成されているが、爆風による影響は皆無であった。

図 5 は切削抵抗測定用のバイトホルダーの略図である。工具動力計としては、バイトの両側面にそれぞれ 1 枚ずつ半導体ひずみゲージ

(ゲージ率: $-117+10\%$) を接着 (一方は前縁に、他方は後縁に) したものであり、主切削力が測定できる。測定系は原理的に 図 3 と同じような配線であるが、ブリッジの構成抵抗 R_1, R_2 の位置にひずみゲージを置き換えたもので、 R_3, R_4 の位置には標準抵抗 (100Ω) を用いた。切削力測定時、ブラウン管面には

図 3 平均切削速度測定系 (平均切りくず流出測定系を含む) のブロック・ダイアグラム

注) 実線系: 切削速度測定系 点線系: 切りくず流出速度測定系
コンタクト 1, 2 は切りくず流出速度測定時にはずす。

1. 切削開始点 2. 切りくず流出速度測定用のワイヤ・スクリーン破断点 3. 切削速度測定用ワイヤ・スクリーン破断点

図 4 掃引波形の例

1. 銃身 2. トリガ・コンタクト 3. パイト 4. 切りくず回収用パイト押え 5. ゲージ・リード線 6. 半導体ひずみゲージ 7. ワイヤ・スクリーン位置

図 5 主切削力測定用パイト・ホルダー概要図

時間—主切削力曲線が画かれる。この曲線には切削開始時、終了時、ワイヤスクリーン破断時の信号が明瞭にあらわれ、既知の掃引速度から平均切削速度がわかる。

2. 実験結果

2.1 切りくずの形状

図 6 は平均切削速度、15000～45000 m/min で排出された切りくずの形状である。

α 黄銅の場合、始めは切りくずの周縁は鋸歯状になり、内部は横方向に亀裂が生じて全体的に慣用切削におけるよりも脆性化している。さらに高速になっても亀裂は発達せずにはわん曲してくる。全般的に連続形に分類でき、この点に関しては慣用切削のものと大差ない。亀裂は工具すくい面に激突した結果生じたものであり、わん曲してくるのは高速化にともない切りくず内部の塑性ひずみが異なるためであると考えられた。

アルミニウムの場合、全切削速度範囲でほとんどカールのない連続した切りくずを排出し、亀裂は発生せず非常にめらかであった。

快削黄銅の場合、慣用切削では小さく丸まった切りくずを排出したが、超高速になるとばらばらに細分化する傾向を示す。さらに高速になるにしたがいこの傾向は著しくなる。この現象もやはり工具との衝突の結果であると考えられる。

以上の結果から切りくず生成の機構は慣用切削と同じようにせん断機構であると考えた方が無理がない。Clark によれば限界衝撃速度は材料によって異なるが、ほぼ 2000～9000 m/min の範囲に存在するから、本実験の切削速度はこの値の約 5 倍である。したが

って限界衝撃速度による破壊機構の変化（切削では切りくず生成機構の変化）が生じることが予想されたのであるが、切りくずの形状からはこの予想の裏付けが得られなかった。単純引張り試験では存在を確認された限界衝撃速度が、切削時には存在しない理由として刃先にかかる応力分布が二次元的なものによると考えられる。

以上のように切りくずの生成機構は本質的な相違は認められなかったが、形状について細部に超高速切削の特徴と考えられる現象が存在していた。

その 1 つに切りくずの幅拡がりがある。幅拡がりとは工具すくい面との接触側が著しく、背面側では小さい。したがって切りくずの厚さは全体的に薄くなっている。

図 7 は幅拡がりや切削速度（平均）の関係を示す。幅拡がりや切削速度が高くなるにしたがい増加している。図 7 の下に一例として 23400 m/min における切りくず断面の組織写真を併記した。写真によれば工具す

$V = 25000 \text{ m/min}$

$V = 45000 \text{ m/min}$

α 黄銅 ($t = 0.5 \text{ mm}$)

$V = 25000 \text{ m/min}$

$V = 45000 \text{ m/min}$

アルミニウム ($t = 1.0 \text{ mm}$)

$V = 15000 \text{ m/min}$

$V = 22000 \text{ m/min}$

快削黄銅 ($t = 0.5 \text{ mm}$)

図 6 切りくずの形状 (工具すくい面との接触側)
($\times 10/3$ 共通)

図7 切りくず幅広がり平均切削速度の関係

くい面との接触側は繊維組織化して横方向へ流れている。背面側に移行すると流動変形している部分は消失して幾分結晶性を維持している。すなわち工具すくい面との衝突の影響は切りくず内部で局限されている。さらに高速になるにしたがい流動変形部は背面側に移行し、ついには全面を覆うようになる。これらの衝撃様式は塑性流動変形⁷⁾の状態にある。

その他の特徴として切りくずの長さがあげられる。切りくず長さは切削長さに比較してわずかに短く、慣用切削のものより非常に長くなっている。切りくず生成機構がせん断機構のほかに考えられない以上、せん断角の存在を仮定するとこの値が非常に大きくなっていることを示す。しかし切りくずには横方向への幅広がりが生じているので、慣用切削のせん断角計算法をそのまま適用できないが、切りくずの幅広がりとは体積的に比較的小さいことと、0.5 mm 以下の切込み深さでは切削速度 25000 m/min 以下でほとんど幅広がりは無視できることから切りくずの流出速度を求めて、せん断角の値を計算した。

図8 は平均切削速度とせん断角の関係を示す。吟味のため切りくず長さや切削長さの比からせん断角の値を求めてみたが、両値はほぼ一致する。せん断角は低速切削の 15° に比較して著しく大きくなっている。同図に 25000 m/min 以上のせん断角の値をプロットしたが、いずれも約 30000 m/min でピークをとり、その後は漸

図8 平均切削速度とせん断角の関係

減する傾向にある。この理由は約 30000 m/min 以上で幅広がり著しくなり、切りくずの流出速度や切りくず長さを抑制するように影響するものと考えられた。

2.2 切削力

超高速切削では普通 10^{-3} sec 以下の間に切削が完了するから、慣用切削で行なうような切削力測定法の適用は困難である。このためきわめて高い固有振動数をもった工具動力計が必要になってくる。しかし感度などを考慮すればおのずから制限を受け、実際にはある値で妥協しなければならない。ここで用いたのは固有振動数約 16 kc で、300 μ sec 程度の持続時間ならば一応測定にさしつかえないものである。

図9 はこの動力計によって得られた主切削力一時間線図の一例である。

図10 は α黄銅⁸⁾ とアルミニウムの場合の主切削力一平均切削速度の関係を示す。いずれも速度上昇とともに切削力は増加しており、慣用切削でいわれる、切削速度が高くなるほど切削力は小さくなるという現象とは異なる傾向がうかがえる。この理由として第1に切りくずが高速でバイトすくい面上に衝突することによる力が加味されるためと思われる。この力はおそらく、切りく

図9 シンクロスコープブラウン管面上にあらわされた切削主分力波形の例

図 10 主切削力と平均切削速度の関係

ずの切削方向での速度の自乗に近い値と比例関係にあると一応考えられるので、実際に切りくず生成に要する力はずっと小さくなるとみられたが、これを定量的に分離することは困難である。またこの力は被削材質、切りくずの状態によってその影響度もかなり異なってくると思われた。第2の理由は高速負荷される材料の降伏点の上昇によるものと考えられた。

2.3 工具摩耗

図 11 はバイトの刃先をすくい面側とにげ面側から

みたものである。バイト材質は SKH-4 と SK-2 の兩種であるが、いずれもかなり摩耗している。刃先には切りくずの流動変形と関係があると思われた付着物が堆積し、この一部はにげ面側に流出して切れ刃を覆うような状態であるので摩耗量を定量的に測定できなかった。しかし摩耗の形態としては切れ刃が丸まり、かえりのような形でにげ面側に曲り、全般的に鈍化している。鈍化の程度は被削材、工具、切削速度などの切削条件に著しく影響されるようである。たとえば硬さが高い被削材を切削した場合に鈍化は著しく、工具では SKH-4 の方が鈍化しにくい、時折りチッピングする傾向があった。切削速度が高くなるにしたがって鈍化は大きくなるが、無制限に大きくなるわけではなく、速度がある程度高まると鈍化の進行はにぶるようであった。

すくい面上の付着物は溶着しており、その付着面積は切削速度が高まるにつれて漸増する傾向を示す。この付着物が慣用切削における構成刃先のような作用をするか否かは確認できなかった。

2.4 切削面

2.4.1 切削面の外観

図 11 切削後のバイト切れ刃の状態 (×10)

図 12 平均切削速度と切削面あらさの関係

図 13 切 削 面 (×200)

一般に慣用切削では高速になるにしたがい切削面は良くなる。しかし超高速切削では図 12 に示すように反対に切削面は悪くなるような傾向を示す。

図 12 は触針式あらさ計で横方向のあらさを測定した結果で、平均切削速度との関係を示すものである。慣用切削と異なる傾向を示す原因として図 13 のようなちりめん状のしわが切削面に発生することによる。

ちりめん状のしわは、初めは局部的にあらわれ、切削速度が高くなるにしたがって発達し、全面に拡がり、さらに微細な亀裂が介在するようになる。亀裂はしわが深くなったものと考えられ、表層部のみに存在し、深部には発達しない。しわの発生時期、形状はそれぞれ材料によって異なるが、全被削材を通じて発生した。

しわの発生因としては、第一に高速負荷される材料の降伏点の上昇にともない刃先が切削面上を摩擦する際に行なうほり起こし作用とせん断作用によるもの、第二に刃先と被削材の接触点に生じる応力波の不連続的な挙動⁹⁾などが考えられるが、この現象を定性的に解明するまでにはいたっていない。

2.4.2 かえり

切削面の側方には慣用切削でもしばしばみられる「かえり」が認められた。これは全被削材に共通してあらわれ、慣用切削における流出状のかえりに似ている。

図 14 にかえり量と切削条件の関係を示す。この現象は切削間、刃先近傍の堆積物が切りくずとともに流出できず、切削面の側方にはみ出たものと思われ、前項のちりめん状のしわも影響することが考えられる。

2.4.3 加工変質層

切りくず生成機構がせん断機構のほか考えられぬ以上、切削面表層部には必ず加工変質層が存在するわけである。加工変質層の測定は従来いろいろな方法が用いられているが、ここでは食凹法を用いた。食凹法によれば転位と食凹は 1:1 に対応するもので、食凹を適当な手段で発達させ顕微鏡下で見ればとりもなおさず転位を目視するのと同じ効果をあたえるものである。被削材として用いたα黄銅はとくにこの条件に合致するものである。

被削材を十分に脱酸、脱水処置をほどこした炉中で焼鈍し、成形によるひずみ組織を完全に除く。これを切削した後、切削面に垂直に切断し、その断面について切断の影響があ

切削条件: $V=30000$ m/min, $t=0.5$ mm, α黄銅

$$\text{* かえり率} = \frac{b' - b}{b} \times 100$$

b' : 切削幅, b : かえりが生じていない場合の切削幅 (計算値)

図 14 平均切削速度とかえりの関係 (t 一定)

らわれなくなるまで検鏡しながら電解研磨, 電解腐食を繰返し, 切削のみに関係する食凹を表出させる。

図 15 は一例として, 切削面表層部の食凹の配列, 変形組織を示すものである。切削面付近はダレのため変形組織の細部はわからない。そのため切削面を少しずつ溶

切削条件 $V=22000$ m/min, $t=0.2$ mm, 電解液: 正燐酸 ($d=1.5$) 液, 腐食液: 0.2% チオ硫酸ソーダ液, 被削材: α黄銅

図 15 表層部変形組織と食凹表出状態

図 16 切込み深さと変質層深さの関係

去し上層部の変形組織を調べた。その結果, 図15の右に示すような変形組織が得られた。最上層部の細かい波状のひずみ模様は, 切削面にあらわれたちりめん状のしわに起因するものである。そのほかの変形組織は慣用切削のものと同じような傾向を示した。

図 16 は切込み深さと加工変質層深さ (平均値) の関係を示す。変質層深さは定義により, 食凹が消失するところと切削面間の距離であらわす。被削材が回収部に突入し, 停止する場合に生じた変質層は, 切削で生じたものにくらべてきわめて小さいものであった。図 16 の値は切削以外で生じた影響を補正したものである。その結果, 変質層深さは慣用切削で生じたものよりも小さく (約1/2以下), 切削条件によってかなり影響されることが認められた。

3. ま と め

上記の研究結果をまとめて以下にする。

- (1) 切りくず生成機構はせん断機構であると判断された。切りくず工具すくい面に衝突した結果, 塑性流動変形し, すくい面接触側の横方向へ著しく流動している。せん断角は慣用切削の場合より著しく大きくなっている。
- (2) 切削抵抗は慣用切削とは反対に, 速度上昇にともない増大する傾向を示す。この理由は高速負荷にともない材料の降伏点が増大すること, および衝突時の力が加味される結果によるものと思われた。
- (3) 工具の摩耗は全般的に生じている。この程度は工具の材質, 被削材の材質, 切削条件な

どによってかなり影響される。工具すくい面上には被削材の一部が溶着している。

- (4) 切削面のあらさは、ちりめん状のしわが発生するため高速になるほど悪くなる。これは被削材に共通的な現象であった。切削面の側方には流出状かえりが見られ、この生成因にちりめん状のしわが関与すると思われた。
- (5) 加工変質層を食凹法を用いて検討した結果、切削面近傍の変形組織は慣用切削のそれと類似していた。変質層深さは慣用切削のものにくらべてきわめて小さく、切削条件に影響されることがわかった。

おわりに本研究で用いた小銃、弾薬を提供された陸上幕僚監部武器課、第三方面総監部武器課ならびに実験に協力された防衛庁技術研究所岩本尚氏に深甚の謝意を表する。
(1964, 2月10日受付)

参 考 文 献

- 1) Dr. Salomon : ドイツ特許 523. 594 (April 27, 1931).
- 2) T. Von Kármán & P. Duwez : J. Appl. Phys., 21 (1950) 987.
- 3) D. S. Clark : Trans. ASM, 46 (1954) 34.
- 4) G. H. DeGroat & A. Ashburn : Amer. Machinist, 104. 4 (1960) 111.
- 5), 8) 田中義信, 岩本尚 : 精機学会春季大会前刷, (1962) 13.
- 6) 笠原英志 : 超高速切削に関するシンポジウム, (1962) II-1.
- 7) M. P. White & Le Van Griffis : J. Appl. Phys., (Sep. 1948) 256.
- 9) L. H. Donnell : Trans. ASME, Vol. 52 (1930) 153.

(42頁より)

本機は部品のフライス加工を高能率に行なうように計画設計された取扱容易なひざ形生産フライス盤であります。

中、小量多種生産にも適合し、電気機器、精密機器、自動車、その他一般工場において超硬合金あるいは高速度硬カッターによる溝入れ、平面削り、正面削りなどの各種フライス加工にも適しています。

主要特長

1. テーブル送りはドッグを使用して、自動サイクルができます。
2. テーブル送りねじには、油圧式自動背隙除去装置を備え効果的な下向削りが行なえます。
3. 早送り、早戻りにより極力遊び時間を少なくすることができます。
4. テーブルの送り方向、切削送り、早送りの切換は、電気的に行なわれます。
5. 主軸はキルタイプでクロスフィード潤滑されておりますので、潤滑油の冷却効果は 100% であります。
6. 主軸回転速度、テーブル送り速度の変換は換歯車

により、工具なしで簡単に行なえます。

7. ご要求により特別付属装置として潤滑油の強制冷却器、フライホイール、テーブルしゅう動面を自動的に毎日 1 回給油する装置を付すことができます。

仕 様

テーブル	寸法	1,300×300 mm
	左右移動距離	700 mm
	上下 "	350 mm
	送り量	16種 20~1,300 mm/min
	早送り	7,000 mm/min
主 軸	ターボ孔	ナショナルターバー # 50
	標準アール径	32 mm
		30~500 rpm
		45~750 rpm
	回転数※	12種 標準 60~1,000 rpm
		90~1,500 rpm
		120~2,000 rpm
	前後移動距離	75 mm
	主軸中心よりテーブル上面までの距離	0~350 mm
電 動 機	主軸用	3.7 kW
	送り用	0.75 kW
重 量		1,900 kg

※ 主軸回転数はいずれか 1 つをご選択願います。