金属材料の高速切削加工における酸素圧力の効果*

小笠原 聡史** 森 田 昇*** 吉田 嘉太郎***

Effect of Oxygen Pressure on High Speed Cutting of Metal Materials

Satoshi OGASAWARA, Noboru MORITA and Yoshitaro YOSHIDA

In this study, which is aimed at understanding the machining characteristics in vacuum for a super-clean room and outer space, a high-speed machining system in a vacuum chamber whose pressure can be reduced to 6×10^{-6} Pa, is newly developed and diamond cutting experiments using aluminum and copper workpieces are carried out. Some unique phenomena are observed, which are (a) a strong dependence of the cutting force on oxygen pressure, (b) a deposited product like a build-up edge on the rake face at pressure above 10^2 Pa, (c) an adhering and sticking of chips on the workpiece surface at pressure under 10^2 Pa. These phenomena can be well explained by an oxygen adsorbing model for the newly generated workpiece surface and chip surface. The cutting force increase in high vacuum is closely related to a chemical interaction between a chip and a tool surface.

Key words: High-Speed Cutting, Vacuum Chamber, Oxygen Pressure, Cutting Force

1. 結 言

超高真空、各種雰囲気気体、高温および極低温といった特殊環境下での加工現象を理解することは、通常の加工で現れる複雑な事象に対して本質的な知見を与えてくれるものと期待される。この観点から、真空中における加工特性、中でも最も基本的な運動転写加工である切削加工の真空中での特異現象を理解し、その支配因子を抽出することは、切削油剤の作用機構を理解したり、無塵環境としての真空クリーンルームの利用を検討するうえで重要であると考えられる。

従来より、真空雰囲気中での加工特性については、いくつか報告されてきた^{1)~4)}。いずれの場合にも、 10^{-2} Pa程度までの真空雰囲気中で高速度鋼または超硬合金製の工具により数m/s程度までの切削速度で実験を行った結果として、酸素の効果が現れ出されており、切りくず新生面に生じる酸化吸着層の潤滑作用²⁾、あるいは工具-切りくず間に生成する酸化物による加工特性の変化³⁾などが示されている。

既報⁵⁾では、無塵環境としての真空雰囲気中での切削現象を基礎的に理解することを目的として、主に大気圧の酸素とアルゴンガス中、ならびに 6.7×10^{-5} Pa程度の真空中での切削特性の加工条件依存性について検討すると共に、特異現象の抽出を行った。本論文では、被削材種と工具材種に着目した高速切削特性の酸素圧力依存性について検討すると共に、抽出された特異現象の支配因子について考察を行った。

2. 実 験 方 法

図1は試作した真空中切削評価システムの概略図である。こ

のシステムは、雰囲気をコントロールするための真空制御系、真空中での切削加工を可能にする切削制御系、切削力の測定とデータ処理を行うための測定処理系から構成されている。真空制御系は、油回転ポンプ、ターボ分子ポンプ、チタンゲッタポンプ、イオンポンプおよび加工室としてのチャンバからなり、チャンバ内の到達圧力は 6.0×10^{-6} Paである。またリークバルブから雰囲気ガスの導入が可能である。排気口には、切りくずの流入を避けるため、金属製のひれ(①)を付加している。

切削制御系は磁気軸受を使用したスピンドル(②)、半径方向の工具送り機構(③)およびこれらを駆動するドライバからなる。スピンドルの上に被削材(⑥)を固定し、工具(⑤)をその半径方向に送ることにより正面切削を行う構造となっている。切込みは、ねじ(④)による工具シャンクの粗動(2mm/rev)と磁気軸受のラジアル方向変位(10mV/ μ m)による微動を組み合わせて与える。この場合、あらかじめ前加工を行った切込み位置から微動機構による切込み設定を行うことで、安定した切込み量を精度良く再現できる。

切削力の測定では、切削の際に作用する磁気軸受の反力を、1msの時間間隔でA/D変換してコンピュータ解析を行う。図2はチャンバ内での切削を表す概念図である。切削分力は、磁気軸受に作用する3方向の反力に対応しており、被削材の接線方向成分を主分力 F_t 、垂直方向成分を背分力 F_v 、工具送り方向成分を送り分力 F_f と定義した。また、切削中の切りくずの散乱を防ぐため、加工面に段差をつけて5つに分割し、1回の切削時間を短縮している。これにより、切削速度も被削材の半径方向に5段階(図中A, B, C, D, Eで表示)に変化させた。

被削材には工業用純アルミニウムA1050と無酸素銅C1020を、工具には単結晶ダイヤモンドと超硬合金を用いた。切削条件は切削速度69~138m/s、切込み量40 μ m、送り速度0.038mm/revである。実験では、チャンバ内を 1.0×10^{-6} Paまで減圧した後に酸素を導入し、所定の圧力に設定した。表1は

* 原稿受付 平成9年4月14日

** 学生会員 千葉大学大学院(千葉市稲毛区弥生町1-33)

*** 正会員 千葉大学工学部

Fig.1 Schematic view of the cutting apparatus in high vacuum

Fig.2 Schematic condition of vacuum cutting

Table 1 Condition used for the cutting experiment

Workpiece	Pure aluminum (A1050) Oxygen free copper (C1020)
Tool	Single crystal diamond Cemented carbide (WC+Co) (Rake angle=0°, Clearance angle=11°, Corner radius=0.4mm)
Cutting speed	69.1-138.2m/s, (22000rpm)
Depth of cut	40μm
Feed rate	0.038mm/rev
Oxygen pressure	3.0×10^{-5} – 1.0×10^5 Pa, Dry

実験条件をまとめたものである。

3. 酸素圧力が切削特性に及ぼす影響

まず、被削材種が切削特性に与える影響を検討した。被削材は純アルミニウム (A1050) と無酸素銅 (C1020) の2種類で、工具は単結晶ダイヤモンド工具である^{5)~7)}。

図3は主分力 F_h の酸素圧力依存性である。純アルミニウムの場合 (図3(a))、主分力 F_h は 10^{-5} Paから酸素圧力の増加にともない減少する。そして 10^2 Pa (以下、臨界圧力と呼ぶ) 付近で極小となり、その後酸素圧力の上昇とともに増加する。その傾向は切削速度にほとんど依存しない。一方、無酸素銅の場合 (図3(b))、主分力 F_h は酸素圧力に対し比較的弱い依存性を示すが、切削速度に対する増加率は大きい。また、純アルミニウムの場合の主分力よりも全体的に大きい。

純アルミニウムの切削抵抗については、無酸素銅の場合と比較して強い酸素圧力依存性を示すが、この点は上原らの実験結果³⁾と類似している。上原らは、高圧側での切削抵抗の増大現象について、切削中の切りくずと工具すくい面間に生成される酸化物に起因すると推察しており、純アルミニウムに比べ化学的活性度の低い無酸素銅の場合にはこの効果が小さいものと解釈できる。しかし、今回の臨界圧力の存在とこれより低圧側での切削力の増大現象については本実験における特異的な現象となっており、切りくず新生面と工具すくい面との化学的な相互作用などが関与している可能性が強い。

図4は、酸素中 (1.0×10^5 Pa) で切削後の工具すくい面の写真である。純アルミニウムの切削 (図4(a)) では、工具すくい面の切りくず接触領域に幅0.5mm、長さ1.5mm程度の凝着が認められる。一方、無酸素銅の場合 (図4(b)) には、純アルミニウムの凝着物ほど強固ではないが同規模の黒い付着物が、切りくず接触領域の周辺に確認された。これらは臨界圧力より高圧力側で現れ、圧力が高くなるほど顕著になったが、その厚みは非常に薄いものであった。しかし、臨界圧力より低圧力側では、この現象は全く見られなかった。また、SEMによる工具の観察結果から、工具摩耗は被削材、雰囲気によらず観察されなかった。

図5は、酸素圧力 3.0×10^{-5} Paにおける加工面の写真である。被削材によらず、加工面には切りくずの再付着が確認される。加工面への付着は、切りくず自由面側と切りくず新生面側に関係なく生じた。これは臨界圧力より低圧力側で現れ、圧力が低くなるほどその量を増した。しかし、臨界圧力より高圧力側では、この現象はまったく見られず光沢面が得られた。切りくずの付着は被削材によらず認められたが、付着の度合いは純アルミニウムの方が (図5(a)) が顕著であった。

(a) Pure aluminium

(b) Oxygen free copper

Fig.3 Effect of oxygen pressure on cutting force (F_h)

(a) Pure aluminium

(b) Oxygen free copper

Fig.4 Photographs of deposited state on rake face at a pressure of 1.0×10^{-5} Pa

(a) Pure aluminium

(b) Oxygen free copper

Fig.5 Photographs of the cut surface at a pressure of 3.0×10^{-5} Pa

切りくず形態は被削材によらず、臨界圧力より高圧力側では流れ型であったが、低圧力側ではむしれ型と流れ型が混在した状態となっていた。純アルミニウムの方がむしれ型切りくずを多く排出した。また、切りくずの色は純アルミニウムで酸素圧力によらず自由面側で白濁色、切りくず新生面側で光沢状であった。一方、無酸素銅の場合、低圧力側では淡い色をしていたが、高圧力側ではくすみを帯びた赤褐色であった。

図6は酸素中(1.0×10^{-5} Pa)での切りくず新生面側のSEM像である。純アルミニウムの場合(図6(a))、高圧力側では凝着物の擦過によると思われる筋状の条痕が、すべての場所において観察された。一方、低圧力側ではそのような条痕は生じなかつ

た。無酸素銅の場合(図6(b))には、圧力に関係なくそのような条痕は観察されなかった。

4. 切削現象の酸素圧力の依存性とその支配因子

切削力の変化、工具すくい面での凝着、加工面への切りくずの再付着、切りくず形態の4項目とも、臨界圧力を境界として、傾向が変化している。このことから、臨界圧力付近に切削現象を大きく変化させる本質的な要因が存在すると考えられる。

図3で酸素分圧が 10^2 Pa付近のときに現れる切削力の極小値やこれより高圧側で生じる切れ刃への酸化物凝着現象、ならびに

これより低圧側で生じる切りくずの付着・接合現象等は、工具－切りくず接触界面へ酸素分子が侵入し切りくず新生面に酸素単分子吸着層を形成すると仮定すれば、この単分子吸着層形成時間と工具－切りくず接触時間との関係を比較することで合理的に説明できると考える²⁾。具体的には以下のモデルについて考察する。

雰囲気気体としての酸素が切削現象に直接影響を与えるのは、切りくずと工具が接触している時間内と考える。そこで、酸素分子が切りくず新生面に単分子吸着層を完成する時間 τ を求める。切りくず新生面に飛来してくる酸素分子がすべて吸着すると仮定すれば、 τ は式(1)のように表すことができる⁸⁾。

$$\tau = 1.72 \times 10^{-23} \times \frac{\sqrt{32 \times T}}{P \cdot d^2} \quad (1)$$

ここで、 T は切りくず新生面の絶対温度、 P は酸素圧力、 d は酸素分子を剛球と考えた場合の半径（1.82 Å）である。また、切りくず新生面が工具すくい面と接触する時間 θ を求めると、式(2)のようになる⁹⁾。

$$\theta = \frac{\ell}{\gamma \cdot v} \quad (2)$$

ここで、 ℓ は切りくずと工具すくい面の接触長さ、 v は切削速度（69～138m/s）、 γ は切削比である。

図7は酸素の単分子吸着層形成時間 τ の酸素圧力依存性（図中、負の勾配をもつ直線群）および切りくずと工具の接触時間 θ （図中、横方向の斜線部）を示したものである。 τ の算出にあたっては、切りくず新生面温度 T を500Kから1500Kの範囲で与えたが、図で示すように τ の値に大きな差異は認められない。また、切りくずの接触長さ ℓ と切削比 γ は、実験結果から見積もられた値を用いた。図中の網かけ部は $\tau = \theta$ が成立する酸素圧力範囲を被削材別（濃い網かけが純アルミニウム、薄い方が無酸素銅）に示したものである。

図より、 $\tau < \theta$ の関係が成り立つ酸素圧力の範囲、すなわち酸素分子吸着層完成時間よりも切りくず工具すくい面の接触時間の方が長い場合には、切りくず新生面と工具すくい面の接触時間内に酸素分子吸着層が完成されるはずである。一方、 $\tau > \theta$ の関係が成り立つ酸素圧力の範囲、すなわち切りくず工具すくい面の接触時間よりも酸素分子吸着層完成時間の方が長い場合には、接触時間内に酸素分子吸着層は完成されないと考えられる。そして、 $\tau = \theta$ の成立する酸素圧力は、実験における臨界圧力の 10^2 Pa前後ではほぼ一致している。

このことは、 $\tau < \theta$ の関係が成り立つ酸素圧力の範囲では、工具と切りくずの接触部分で切削熱による酸化反応が起こり、これが切削挙動に影響を及ぼす可能性のあることを示唆している。

そこで、X線マイクロアナライザ（EPMA）を用いて、図4に示した工具すくい面の凝着物および付着物の元素分析を行った。EPMAによる分析深さは材料の密度と使用した電子ビームの加速電圧から容易に概算でき、今回の分析条件の場合、純アルミニウムで約5 μ m、無酸素銅で約1.5 μ mと見積もられる。凝着物の厚みが非常に薄いことから、その組成分析にはEPMAの適用がおおむね有効と判断された。純アルミニウムの場合には純アルミニウム、アルミナ（ Al_2O_3 ）および工具すくい面の凝着物、無酸素銅の場合には無酸素銅、酸化銅（ Cu_2O ）および工具

(a) Pure aluminum

(b) Oxygen free copper

Fig.6 Photographs of rake face side of chips

Fig.7 Oxygen pressure versus the time for forming a monomolecular absorbed layer on chip

すくい面の付着物をそれぞれ分析した。

図8はそれぞれのK β 線スペクトルである。図中(a)に示すように Al_2O_3 と凝着物のスペクトルは一致しており、酸化物に特有のサテライトピークも明りょうに認められた。また、図中(b)に示すように Cu_2O と付着物のスペクトルもほぼ一致した。以上の結果から、工具すくい面の凝着物および付着物の主成分として、それぞれ Al_2O_3 と Cu_2O などの酸化物が含まれていることが確認できた。

この事実は、臨界圧力より高压側では、高速で摩擦し合う工具すくい面と切りくず接触部分において摩擦熱による酸化反応が起こっていることを示唆しており、本実験に特異な現象といえる。このことは、今回の特異現象の発現が切りくずや被削材新生面での酸素単分子吸着層の形成に支配された現象であるこ

とを強く示唆している。また同時に、真空槽中の酸素分圧が工具と切りくず界面の酸素分圧とはほぼ同程度であることも示している。

本実験における4項目の特異現象は、本質的には酸素単原子吸着層の形成に基づいて、相互に関連させて説明できる。まず、臨界圧力より高压側では、上述の酸素単分子吸着層の形成と切削熱に起因した切りくず新生面の酸化により、酸素圧力の増加に伴って工具すくい面上への凝着物の成長が認められ、この凝着作用が切りくずの排出を妨げることで切削力が増加すると解釈される。この場合、純アルミニウムに比べ化学的活性度の低い無酸素銅では凝着物の形成があまり促進されないため、切削力の変化は小さい。また、純アルミニウムの切りくず新生面には、凝着物による擦過痕が形成されるようになる。

一方、臨界圧力より低压側では、酸素単分子吸着層が形成されにくいいため、切削力の酸素圧力依存性には主として、活性な切りくず新生面と工具すくい面間の直接的な相互作用力に関与していると考えられる。また、加工面への切りくずの付着は、酸素分子吸着層がほとんど存在しない極めて清浄な表面同士に起こる一種の固相接合現象といえる。酸素圧力の低下とともに新生面間の相互作用力は顕著になるので、切削力が増すものと解釈される。この場合も、純アルミニウムに比べ化学的活性度の低い無酸素銅では切削力の変化率は小さい。

5. 工具材種が切削特性に及ぼす影響

予備実験の結果、単結晶ダイヤモンド工具とCBN工具、およびサーメット工具と超硬合金工具は、それぞれ同様な加工特性を示した。前者は高硬度・低じん性な非金属材料であり、後者はそれと比較して低硬度・高じん性な合金工具である。ここでは後者の代表として超硬合金工具を選定した。被削材は純アルミニウムである¹⁰⁾。

図9は主分力の酸素圧力依存性である。超硬合金工具を用いた場合の主分力は、単結晶ダイヤモンド工具の場合（図3(a)）のそれよりも、全体的に大きい。変化の割合は小さい。この傾向は切削速度が大きいとき顕著である。

図10と図11は切削後の工具刃先のSEM像である。超硬合金工具の場合は、単結晶ダイヤモンド工具の場合と異なり、酸素圧力によらず工具刃先での凝着現象が見られた。凝着物の形態については、単結晶ダイヤモンド工具の場合は工具すくい面に薄く層状に形成されるのに対し、超硬合金工具の場合には切れ刃に沿って厚く堆積する形態を示した。また、凝着物を除去した後、SEMにより工具刃先を観察したが、工具摩耗は工具材種、雰囲気によらず観察されなかった。

図12は加工面の写真である。いずれの工具の場合においても、酸素中（ 3.0×10^{-5} Pa）での加工面には、単結晶ダイヤモンド工具の場合と同様に切りくずの再付着が見られたが、その割合は明らかに小さい。これは単結晶ダイヤモンド工具と同様に臨界圧力より低圧力側において現れ、圧力の低下にともない顕著になった。一方、臨界圧力より高圧力側ではこの現象は全く見られなかったが、加工面は単結晶ダイヤモンド工具の場合よりも白濁していた。

切りくず形態は工具材種に関わりなく、臨界圧力より高圧力側では流れ型のみであるが、低圧力側ではむしれ型と流れ型が混在した状態となっていた。なお、単結晶ダイヤモンド工具の場合よりも、むしれ型の切りくずは少なかった。また、切りく

(a) Pure aluminum

(b) Oxygen free copper

Fig.8 Results of electron probe X-ray microanalysis of deposited product on rake face at a pressure of 1.0×10^{-5} Pa

Fig.9 Effect of oxygen pressure on cutting force (Fh)

ずの色は工具材種、酸素圧力によらず自由面側は白濁色、新生面側では光沢状であった。切りくず新生面側には、単結晶ダイヤモンド工具の場合と同様に、超硬合金工具の場合にも臨界圧力より高圧力側では筋状の凹凸が見られたが、低圧力側のそれには認められなかった。

工具材種が超硬合金の場合、単結晶ダイヤモンドと比べて切削力の酸素圧力依存性が小さいことがわかる。これは、酸素圧力によらずすくい面に凝着物が形成されることに起因していると考えられる。低压側では切りくずとすくい面の新生面同士の金属接触による凝着が生じ、高压側では切りくず新生面の酸化

(a) Single crystal diamond tool

(a) Single crystal diamond tool

(a) With single crystal diamond tool

(b) Cemented carbide tool

(b) Cemented carbide tool

(b) With cemented carbide tool

Fig.10 Photographs of the cutting edge after cutting aluminum at a pressure of $3.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$

Fig.11 Photographs of the cutting edge after cutting aluminum at a pressure of $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$

Fig.12 Photographs of the cut surface at a pressure of $3.0 \times 10^{-5} \text{ Pa}$

による凝着が支配的と考えられる。したがって、酸素圧力に対する切削力変化の度合いは小さく、臨界圧力も現れにくくなると解釈できる。

6. 結 言

本研究では、真空雰囲気中での切削現象を基礎的に理解することを目的として、酸素圧力減圧下で純アルミニウムおよび無酸素銅の高速切削実験を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 主成分の酸素圧力依存性は純アルミニウムで比較的強く、 10^2 Pa 付近で極小となる。
- (2) 10^2 Pa 付近よりも高圧力側では、工具すくい面への凝着や付着が認められ、それらは Al_2O_3 と Cu_2O を主成分として含んでいる。
- (3) 逆に 10^2 Pa 付近よりも低圧力側では、被削材新生面への切りくずの付着が認められ、これは純アルミニウムで顕著である。
- (4) これらの特異現象は、工具－切りくず接触界面へ酸素分子が侵入し酸素単分子吸着層を形成するモデルを想定すれば合理的に説明される。
- (5) 工具材種が超硬合金の場合、単結晶ダイヤモンドと比べて切削力の酸素圧力依存性が弱い。

謝 辞

本研究の遂行あたり実験に協力いただいた本学修士課程学生嶋頭司

君に感謝申し上げます。

なお、本研究の一部は平成8年度文部省科学研究費補助金（基盤研究(A)課題番号08305004）によるものであることを記してお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) J.A.Williams and W.M.Stobbs: Change in Mode of Chip Formation as Function of Presence of Oxygen, Met. Technol., 6, 11 (1979) 424.
- 2) 上原邦雄, 壇原袈裟男: 炭素鋼およびチタンの真空中の切削状態, 精密機械, 38, 4 (1972) 363.
- 3) 上原邦雄, 壇原袈裟男: 銅およびアルミニウムの真空中の切削挙動, 精密機械, 41, 11 (1975) 1043.
- 4) 古市亮蔵, 玉村謙太郎, 杉本 有: ふん囲気が切削現象に及ぼす影響, 日本機械学会論文集 (第3部), 32, 234 (1966) 329.
- 5) 小林博文, 森田 昇, 吉田嘉太郎: 特殊環境下における切削加工の研究 (第1報, 真空内切削装置の試作と純アルミニウムの加工実験), 日本機械学会論文集 (C編), 62, 603 (1996) 264.
- 6) 小笠原聡史, 森田 昇, 吉田嘉太郎: 真空雰囲気での切削加工に関する研究 (第2報, 雰囲気の効果), 日本機械学会第73期通常総会講演会講演論文集(IV), (1996) 321.
- 7) 森田 昇, 吉田嘉太郎, 小林博文: 特殊環境下での切削加工に関する研究, 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1995) 59.
- 8) 黒田 司: 表面電子物性, 日刊工業新聞社, (1990) 186.
- 9) 白井英治: 切削・研削工学 (上), 共立出版, (1985) 16.
- 10) 小笠原聡史, 森田 昇, 吉田嘉太郎: 特殊環境下での切削加工に関する研究 (第2報) - 被削材および工具材種の影響 -, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1997) 1075.