シリカ微粒子を利用した固体潤滑法の提案*

柳原 聖^{*1}, 谷 泰弘^{*1}, 村上良彦^{*2}Proposal of New Solid Lubrication Technology Employing
nm Silica ParticlesKiyoshi YANAGIHARA^{*3}, Yasuhiro TANI and Yoshihiko MURAKAMI^{*3} Institute of Industrial Science, The University of Tokyo,
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505 Japan

A new cutting lubrication method employing solid lubricant has been proposed for green machining. In this method, nm order silica particles were selected for the lubrication agent, referring to glass extrusion process. Glass has not only an ability to lubricate, but also it has some great advantages, for example, the strong electrostatic to manipulate its motion. Therefore paying attention to electrophoresis in particular, the lubrication method, spraying nm order silica particles under colloidal condition around cutting area and guide them to the cutting point, was tried out. The result showed the good prospect of the method, such as reduction of cutting force and burr, long tool life since glass particles promote better chip flow, and that also proved this method was efficient for environment.

Key Words: Cutting, Cutting Fluid, Drilling, Cutting Force, Tool Wear

1. 緒言

環境負荷の低減を目的に著者らは固体潤滑剤の探索とその供給方法の開発に興味を抱いている。切削加工における固体潤滑剤を主剤として利用する研究は、K. Ueharaら⁽¹⁾のゲーレンナイトの提案以降、新しい提案はない。その理由は固体であるがゆえに油などの流体と比較して供給の方法がはけ塗りなどに限定され、自動化に不向きであるからと考えられる。しかし、固体潤滑物質となりうる物には良好な静電特性を有するものがあり、その特性を利用すれば、あらかじめ工具に電場を与えるなどして、静電吸着や電気泳動などの現象を利用しながら、固体潤滑剤を加工点に供給することも可能と考えられる。

そのような中で著者らは、熱間押し出し加工においてガラスが潤滑剤として用いられていることに注目した。なぜならば、ガラスには潤滑剤としての機能だけでなく、帯電列が上位のため静電特性が良好で、微粒子にすれば液中で電気泳動を使った運動制御が可能と考えられるからである。更に、ガラスは塑性加工において潤滑剤としての実績があるため、種類、流通、廃棄においても他の固体潤滑剤と比較しても環境負荷を低減できる有利な点が多く見込まれる。

そこで本報においては、ガラス潤滑剤成分に含まれている珪素酸化物の潤滑特性に着目し、シリカ微粒子を用いながら電気泳動によりそれを加工点に吸引する供給方法を提案する。

2. ガラス潤滑法と切削加工適用への可能性

2.1 適用が見込める切削加工形態の検討 熱間押し出しにおいては、ピレットとダイスの間に固体、あるいは水ガラスのような液体でガラスが供給される。このときガラスはピレットとダイスの直接接触を防ぐことで熱化学反応による工具の摩耗を抑制し、良好なメタルフローを促進する⁽²⁾。押し出し条件は、加工する材料の特性に応じて様々であるが、文献⁽³⁾においては、SUS304を相対速度1m/s以下、押し出し圧力が100～130MPaと比較的切削加工で工具に加わる速度と圧力(例：切削加工では速度2～4m/s、数百MPa～GPaの応力(圧力)が工具すくい面に生じる⁽⁴⁾)に類似した条件で押し出すときに、膜厚を40μm程度とすると押し出し抵抗の低下と疵のない良好な製品が得られている。

これを参考にして、このような押し出しの加工形態に比較的類似した切削加工の形態を考慮したところ、最初に小径のドリル加工に適用することが望ましいと考えられた。その理由を列挙すると次になる。

・小径工具の場合、周速が比較的低いので構成刃先の凝着などが生じ易く凝着抑制できる潤滑が必要。

* 原稿受付 2002年12月20日。

^{*1} 正員、東京大学生産技術研究所(〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)。^{*2} オーエスジー(株)(〒442-8544 豊川市本野ヶ原1-15)。

E-mail: kiyoshi@iis.u-tokyo.ac.jp

Fig.1 One idea to lead silica particles to tool using electro-phoretic deposition phenomenon

・コーティング工具ではコーティング層が切れ刃を覆ってしまうため鋭利な切れ刃が得られず、バリが生じやすい。

・小径のドリルにおいては切れ刃に対してチゼル部の比率が相対的に大きく、チゼル部を中心に押し出しに近い作用⁽⁵⁾を望めると予想される。

これらの考えを基にして、最初に平均粒径 $5\mu\text{m}$ のガラス粒子を加工点に供給しながらドリル加工を試みた。しかし、ガラス粉末は、工具の回転に伴ってそのほとんどが吹き飛ばされてしまい、その潤滑効果を期待することはできなかった。

2.2 静電特性を利用した工具への吸引 そこで緒言にて述べたようにシリカ微粒子の静電特性に着目して加工点への導引を考えた。ガラス等の珪素酸化物はエボナイトと同等かそれ以上に帯電列の上位に並び、正極に帯電しやすい性質を有する。したがって、微粒子として水系の液体中に分散すると、粒子のまわりに電気二重層を形成し正極へ電気泳動する⁽⁶⁾。よって、図1のように帯電したシリカを含んだコロイド溶液を加工点付近に噴霧しながら、工具と工作物を電極として電圧を加えれば、能動的に工具にシリカを吸引付着させることが可能になるのではないかと考えた⁽⁷⁾。そして、この工具に付着したシリカ粒子自身が塑性加工におけるガラス潤滑と同様に潤滑効果を発揮すれば、能動的に切削剤を工具に吸引する新しい潤滑剤供給手段になるのではないかと考えられた。

最初に、電気泳動による液中でのシリカ微粒子の吸引挙動を把握することとした。シリカ微粒子の挙動を把握するためには、電気泳動を安定した状態で生じさせることが何より重要と考えられる。これには、シリカの微粒子ができる限り均質に分散されたコロイド溶液が望ましいであろう。そこで、本実験では基礎実験として平均粒子径数十nmのコロイダルシリカ溶液(日産化学工業(株), スノーテックス20)を利用した。

そして、図2のように $\phi 1.0\text{mm}$ のドリルをコロイド溶液の液面から10mm浸し、溶液と工具との接触抵抗を安定させた状態で、工具側を正極、被削材を負極として電気回路を形成させながら電気泳動による工具へのシリカ粒子の吸着を試みた。実験では、5V、10V、30Vと異なる電圧条件下で粒子の泳動を観察したが、いずれの条件においても電極であるドリルに図3のように電気泳動によりシリカ粒子が膜状に付着していた。

Fig.2 Set-up of basic silica adhesion test on drill

(a) tested drill (b) magnified photo

Fig.3 Photos of drill adhered with SiO_2 particles

Fig.4 Current durations of tested circuit in different voltages

シリカは絶縁体である。したがって、電気泳動現象により電極である工具にシリカ微粒子が付着すると、電極に付着した量だけ回路抵抗が大きくなり、回路を流れる電流に付着挙動に応じた変化が生ずると予想される。そこで、シリカ微粒子を吸引するための適切な通電時間を検討するため、回路電流の経時変化を調べた。

各電圧条件下における電流値の変動を図4に示す。いずれの場合においても、実験開始から10s程度で回路を流れる電流値が数mAに一気に収束している。このときの時定数を求めたところ、どの条件でもほぼ1sの時定数であると判明した。したがって、シリカの粒子を工具に付着させるには10Vの電圧を1s間印加すれば十分であり、このときドリルには半径で0.3~0.5mm程度のシリカ粒子の付着層が得られるとわかった。なお、シリカ微粒子の付着力については定量的に計測してはいないが、主軸4000rpmでドリル空転させても飛散することはない程度の付着力であった。

以上の結果よりシリカ微粒子を分散させた溶液と電気泳動現象を利用すれば適切に加工点へ切削剤となるシリカを導くことができると示された。

Table 1 Cutting condition

Machining center	Urawa Co. Ltd. UA-53
Work	SUS304 t2.0mm
Drill	HSS $\phi 1.0$ mm
Spindle Speed	1000rpm
Feed	20 mm/min (0.02 mm/rev)

Fig.5 Comparison of thrust cutting force on each method

3. 切削実験と潤滑効果の確認

次に、付着させたシリカ微粒子に潤滑効果があるかどうかを確認する。実験に際してはあらかじめ工具に電気泳動でシリカ微粒子を付着させて、コロイド溶液の水分が加工に影響を与えないように十分乾燥をさせてから表1の加工条件で切削に供した。

潤滑効果の判断は、切削抵抗の大小により判断した。これは、工具と被削材との接触面における摩擦状態に変化が生じれば、結果的にすくい面上の切りくず流出に影響が現れ、スラスト抵抗が変動すると考えられるからである⁽⁶⁾。

このようにして実験を行ったところ、シリカを付着させた工具と付着させなかった工具では図5のようにスラスト抵抗に明瞭な差異が認められた。図より全体的な傾向としては約10～20%程度、シリカ微粒子の効果による加工抵抗の低下が認められた。この結果から、付着させたシリカ微粒子は加工抵抗を低下させる効果があり、ガラス潤滑のような珪素酸化物を利用した潤滑が切削加工においても有効であることが明らかとなった。なお、このようにシリカ微粒子を付着させた潤滑を以降シリカ潤滑と呼ぶ。

そこで、油剤による潤滑方法と比較してどの程度の安定した効果が見込めるのか工具寿命から判断することにした。なぜならば、切削抵抗、切削温度、切りくず状態など時々刻々と変化する加工状態は、累積された結果として工具の寿命に顕われるからである。図6にその結果を示す。実験では、比較のためMQLと、通常の乾式切削における工具寿命を併記している。なお、工具寿命の判定基準は、本実験においては工具折損までの加工穴数としており、各結果は3回の試行結果の平均を示した。また、シリカ潤滑とMQLにおける切削剤の供給については、加工開始時に一回だけ供給し、MQLでは10mL/hを供給の基準にして、植物性油

Fig.6 Differences of drill life in each method

Fig.7 Photo of drilled holes in each cutting

ベースの切削剤を噴霧している。結果としては、シリカ潤滑を行うことで乾式加工の5倍程度、MQLと同程度の工具寿命が得られており、油剤を使用したMQL法と比較しても遜色のない安定した効果を発揮している。

シリカ潤滑により切削抵抗の変動や工具寿命の改善効果が認められたが、このような加工状態への好影響は加工穴の品位にも当然好影響をおよぼすと考えられる。そこで加工穴の品位を判断する指標の一つであるバリを観察した。図7は、シリカ潤滑、ならびに乾式加工におけるドリル貫通部のSEM像である。シリカ潤滑による加工穴は加工前に1回だけ潤滑剤を付着させてから連続2回の穴あけを行っているために図では2つの穴が示されているが、2回の穴あけを行っているにもかかわらず、乾式にて1回加工した穴よりも形成されたバリがいずれも小さい。また、乾式加工におけるバリは高さが高いだけでなく、バリが切れ刃にまとわりつくように形成されているのがわかる。これは明らかに周速度が高い先端切れ刃肩部の摩耗が進んで、押し出し作用が生じてロールオーバーバリが多く生じたためと考えられよう⁽⁶⁾。一方、シリカ潤滑によるバリにはこのような兆候はなく、ほぼドリルの貫通方向に平行にバリが突出しているのが判断でき、これらの結果から切れ刃の摩耗が抑制されていると判断できる。

4. 潤滑形態の確認

4.1 切削温度の検証による潤滑形態の同定 ガラス潤滑を参考にガラス等の珪素酸化物を主剤とする新しい切削剤供給方法の可能性を検討してきた。もちろん、ガラス潤滑の工具周囲の温度環境と比較すると切削加工工具周囲の温度は押し出しほど高温にはなっていないと予想される。しかし、切削加工においても数

Fig.8 Drilling temperature measuring method

百Mpaの高圧下にあるために局部的に高温高圧が生じて、同じような潤滑作用が発現している可能性も考えられる。そこで、今後の開発指針を得るためにもその潤滑メカニズムを種々の実験から検討する。

最初に、今回の実験における工具周辺の温度環境を把握し、万が一にでも微視的にシリカが溶融し流体潤滑の作用が生じる可能性がないかを確認することとした。ここでは、図8のように工作物に熱電対をあらかじめ埋め込み、ドリル接触時の切れ刃温度を直接計測した。

結果は、乾式加工が380Kでシリカ潤滑は363K程度の平均切削温度で、乾式加工よりも僅かばかりではあるが切削温度が低く加工特性向上に寄与していることがわかった。しかし、シリカ粒子の溶融温度2003Kにはほど遠く、明らかに固体潤滑作用であると結論付けられた。

4・2 シリカ微粒子の潤滑メカニズム そこで、ドリル先端の切れ刃が工作物に埋没した時に加工を凍結し、加工後のドリルフルート部を観察した。すると図9のように工具表面の仕上げ研削痕の間にシリカの微粒子が入り込んだようになっているのが観察された。

すくい面上を切りくずが滑ることを考慮すると、すくい面に顕著な凹凸があると切りくずとすくい面に過剰な摩擦が生じてしまい、加工抵抗を増加させてしまうことが考えられる。一方、電気泳動で工具すくい面にシリカ微粒子を吸着させた場合、シリカ粒子は蒸着や鍍金等のコーティング技術で形成された薄膜などと比較して強固に工具表面に固定化されていることはあり得ない。それらを考慮すると、電気泳動を利用することで、仕上げ研削で生じた研削痕にシリカ微粒子が上手く入り込み、それらシリカ微粒子が工具表面と切りくずの直接接触を防ぎながら、微粒子自身の転動あるいは滑りのような作用が生じて切りくずの流出が促進されたのではないかと推察された。仮にこの推察が妥当であれば、その滑りあるいは転がり作用は、供給されたシリカ微粒子と、工具すくい面の面性状の組み合わせで大きく違いが生じるであろう。

そこで、上記の仮説を検証するために、シリカ以外にも粒子径、ガラス転移点 T_g 、形状の異なるガラス微粒子を3種類用意し、それらの因子の影響を切削抵抗変動から考察することにした。この4種類の珪素酸化物微粒子の特徴を表2に示す。各々の粒子はそれぞれ、A:平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より極めて小さく、化学的に合成された真球状の微粒子。融点は極めて高い。

Fig.9 Adhered silica particles in grooves on rake face

B:平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より若干小さく、低融点鉛ガラスを粉砕して作られた微粒子。

C:平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より大きなビトリファイドcBNホイール用フリットを粉砕して作った微粒子。

D:平均粒子径がフルート部の粗さ R_z より若干小さく、ビトリファイドダイヤモンドホイール用フリットを粉砕して作った微粒子。

というような特徴を有する。

これらを電気泳動で工具に吸着させて加工した場合のスラスト抵抗の違いを図10に示す。図から、潤滑剤の効果が最も生じている加工開始直後の領域において、B, C, Dはほぼ同程度の抵抗になっているものの、Aだけは他の3つと比較して圧倒的に抵抗が低減されていることが理解できる。Aと他の3者との明確な違いは、他の3者がバルクのガラスからボールミルで粉砕して形成されているためにどうしても最小平均粒径が $5\mu\text{m}$ 程度になってしまうのに対し、Aは化学的に合成されているために工具のフルート部の粗さより極めて小さくかつ球形の粒子であることが挙げられる。

このことはシリカ微粒子の潤滑効果が工具すくい面の面性状に影響を大いに受けることを証明しており、その作用を発現させるためには、少なくとも比較的球形で工具仕上げ面粗さより小さい粒子であることが重要と言える。

4.3 工具側からのシリカ微粒子の作用の検討 一方、仮説のようにシリカ微粒子の転がりあるいは滑り作用が切りくず流出を促進させて加工抵抗を低減したとするならば、工具すくい面の粗さが変化した場合に切りくずの流出状態にも当然影響があると考えられる。そのように考えると、それがシリカ微粒子を吸着させた場合にどのような影響を受けるのかを把握しておく必要がある。そこで、すくい面の粗さの違う工具を製作し、図11のような実験システムで旋削による二次元切削を行い、このときの切削抵抗と高速度ビデオ撮影の画像から切りくず流出の変化を観察することにした。観察結果の一部を図12に示す。図12(a)は工具すくい面の粗さが $17.3\mu\text{mRy}$ と実験の範囲で最も粗さの大きい工具でSUS304を切削したときの切削抵抗と切りくず流出状態を示す図であり、(b)は同様の粗さの工具を用い、それにシリカ微粒子を電気泳動で付着させた場合のものである。なお、図中の切削抵抗は図11の構成で言えば送り分力を比較していることになる。主分力ではなく送り分力を比較に用いる理由は、切りくずのすくい面へ

Table 2 Specifications of glass particles

Type	Characteristic	Tg	Mean size	Shape	Structure
A	Chemical synthesized	1027K	20nm	Spherical	Crystal
B	Pb low Tg for insulator	574K	4.7 μ m	Spherical+ Spiky	Amorphous
C	Si-Al-B flit for vitrified wheel	874K	7 μ m	Spiky + Blocky	Amorphous
D	Si-Al-B flit for vitrified wheel	704K	4.7 μ m	Spiky + Blocky	Amorphous

Fig.10 Influences of particle's specification on cutting force^{(10),(11)}

の凝着が生じると切りくず流出が阻害され、主として送り分力にその影響が現れることが我々の従前の研究からわかっていたためである⁽⁸⁾。

まず、粗さの粗い工具で加工を行った場合、すくい面上で切りくずの激しい凝着と剥離が繰り返し生じることがわかった。このため、この凝着剥離に同期して図12(a)のように切削抵抗の変動が大きく発生した。

また、同右側写真を見ると、激しい凝着が生じて切りくず流出が阻害されたために、全体的に分厚い切りくずが排出されていることがわかる。

一方、工具にシリカ微粒子をあらかじめ電気泳動吸着させると、凝着が生じないために、図12(b)のように切削抵抗の変動はなく、極めて薄い良好な切りくずが排出されていた。

切削抵抗で両者を比較すると、切りくずが凝着することで、ほぼ倍近い差が生じており、切りくずの厚さもそれに比して分厚くなっていることが理解できる。

このように切りくずの凝着が生じて切りくず流出に変化が生じると、凝着した切りくずをすくい面から剥離させ、排出させようとする作用が生じるために、切削抵抗には大きな変動が生じる。結果として、切削抵抗の平均値も大きくなる。したがって、このことから切削抵抗の平均値を求めることで切りくず流出の良否を間接的に判断できることになる。図13は工具の仕上げ面粗さと平均切削抵抗との関係をまとめたものである。なお、この図では切削厚さが定常になってから、切削抵抗の下限値を五回計測し、その平均値を表している。図の乾式加工の結果を見ると、工具すくい面の粗さに比して切削抵抗

の下限値の平均値が増加している。よって、このことから工具の粗さが凝着を引き起こし易くし、切りくず流出を阻害し、結果として切削抵抗に悪影響をおよぼしていることが理解できる。

一方、シリカ潤滑では工具の粗さが変化してもほぼ一定の切削抵抗となっており、切りくずの工具への凝着が抑制されて切りくず流出が促進され、加工抵抗が低減されるということが明確になっている。

これらの結果から総合的に考えると、工具に吸着されたシリカ微粒子が、切りくずと工具の直接接触を抑制しながら回転あるいは滑ることで切りくずの凝着を防止し排出を促進していると判断できる。

5. 結論

環境負荷の低減を目的に塑性加工におけるガラス潤滑を参考にして、シリカ微粒子を主剤とする潤滑供給方法を検討した。本研究で得られた結果を下記に記す。

- (1) シリカ微粒子を分散させたコロイド溶液を用い、微粒子の静電特性を利用することで、潤滑剤となるシリカ微粒子を工具に能動的に吸着できることを示した。
- (2) シリカ微粒子を工具に電気泳動を利用して吸着させておくことで、切削抵抗を低下させたり工具寿命を向上させたり、バリを低減させるなどの潤滑効果が見込めることがわかった。
- (3) この潤滑効果は工具に付着させたシリカ微粒子の滑りあるいは転がりといった固体潤滑作用により切りくずの凝着が抑制されて、その排出が促進されるために生

Fig.11 Observation system to verify the interaction between tool rake face roughness and particles

じている。したがって、塑性加工におけるガラス潤滑を参考にしてその適用を試みたが、結果的には異なる潤滑作用であることが明らかになった。

(4) (3)の固体潤滑作用は工具表面の粗さより極めて小さくかつ球形の粒子を使うと得られると判明した。

本研究の一部は大澤科学技術振興財団の助成を受けて行われたことを記し、関係各位に深謝申し上げる。

文 献

- (1) K. Uehara, S. Kumagai, F. Kiyosawa, M. Sakurai, H. Takeshita, Effect of solid lubrications in high speed intermittent metal cutting, Proc. 1st ICPE, (1974), 566.
- (2) 日本塑性加工学会編, 押し出し加工, (1997), 107, コロナ社.
- (3) 古堅宗勝, 松尾 洋, 福康富彦, 中西哲也, 柳本潤, ステンレス鋼管の熱間押し出し加工の変形特性, 鉄と鋼, 85-11 (1999), 801-805.
- (4) 精密工学会編, 精密工作便覧, (1922), 37, コロナ社.
- (5) 和田浩明, 吉田 薫, 金属のドリル加工におけるバリなし化, 精密工学会誌, 66-7 (2000), 1109-1114.
- (6) 静電気学会編, 静電気ハンドブック, (1998), 132-134, (株) オーム社.
- (7) 池野順一, 谷 泰弘, 電気泳動現象を利用した超微粒砥石とその応用, 機論C, 57-535 (1991), 1013.

(a) dry condition

(b) using silica particles conditions
Fig.12 Comparison of cutting force between dry and using glass particles conditions

Fig.13 Influence of rake face roughness on minimum cutting force

- (8) 柳原 聖, 谷 泰弘, 村上良彦, 切削加工におけるSUS304切りくず流動の高速度カメラ観察-工具すくい面の仕上げ面粗さが切りくず流動におよぼす影響-, トライボロジー会議予稿集東京, (2002-5), 271.
- (9) 柳原 聖, 谷 泰弘, 村上良彦, ガラス潤滑による小径ドリル加工, 2000精密工学会秋季学術講演会論文集, (2000-10), 191.
- (10) 柳原 聖, 谷 泰弘, 村上良彦, ガラス潤滑による小径ドリル加工-加工特性向上の要因-, 2002精密工学会春季学術講演会論文集, (2002-3), 65.
- (11) 日産化学工業 (株), コロイダルシリカカタログ.