

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560119

研究課題名(和文) 切削誘起トライボケミカル反応を利用した高生産性環境対応切削加工法の開発

研究課題名(英文) High performance machining process using tribo-chemical reaction driven by controlled atmosphere

研究代表者

酒井 克彦 (Sakai, Katsuhiko)

静岡大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80262856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：環境対応切削技術の一つであるMQL切削加工は生産現場への応用が広まりつつあり、自動車部品生産工程におけるL/D20を越える深穴加工ではMQL加工が主流となっている。ここではソリッド超硬ロングドリルの高寿命化が課題となっている。本研究はミストキャリアにCO₂を用いたミスト潤滑によるドリル深穴加工時逃げ面摩耗低減効果のメカニズム解明、実用上重要なガスコスト低減やドリル以外の加工への適用を検討した結果、供給ガスをCO₂濃度5%程度のN₂混合ガスでも摩耗低減効果があり、その効果発現メカニズムは切りくずや加工面表面にFeCO₃が生成しているためであることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Recently, minimum quantity lubrication technique has been extensively employed as an environmentally and economically conscious machining in all kind of manufacturing fields. For example, deep hole machining process in an automobile factory is replaced by high-productivity drilling which uses solid carbide long drill and internal mist oil supply. In this study, the improvement in tool flank wear by using CO₂ gas as mist carrier was investigated and the mechanism of tool wear reduction was clarified. Further, it was found that the mixed gas with 95% N₂ and 5% CO₂ has almost the same effect on tool wear with 100% CO₂ gas carrier, the formation of FeCO₃ on the chip and finisher surface around the cutting point was identified by EPMA and XPS analysis.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：工具摩耗 深穴加工 環境対応加工 雰囲気制御加工 MQL

1. 研究開始当初の背景

環境対応切削技術の一つであるMQL切削加工は省エネルギーやコスト低減効果も高いことから生産現場への応用が広まりつつある。しかし、MQL切削加工は切削点の冷却効果があまり期待できないことが欠点とされている。そこで申請者らはこれまでにMQLにおいて切削時の発熱を低減させるための様々な方法を提案してきた。切削点に切削油と共に冷却効果の高い水を供給する油-水複合ミスト切削法は、現在ではクーラントミスト法として商品化され生産現場への適用が進められている。

一方、自動車用エンジンのクランクシャフト生産工程におけるアスペクト比が20程度の深穴加工においてMQLドリル加工が主流となってきたが、高価なソリッド超硬ロングドリルの寿命が1000穴程度と短く、潤滑や冷却条件の改善による高寿命化が期待されている。本研究室ではこのような深穴加工を想定した基礎実験を実施し、これまでにS48C調質鋼のMQL穴あけ加工に加工時の酸化発熱低減効果を狙ってミストのキャリアを通常のコンプレッサで圧縮した空気に替えてCO₂ガスを用いた実験を実施し、特異な現象が発現することを見いだす。すなわち通常のみスト潤滑と比較してCO₂ミスト潤滑における切削スラスト力が20%低下することや、通常のみスト潤滑と比較してCO₂ミスト潤滑の1000穴加工時のドリル逃げ面摩耗が50%低減することを見いだした。

以上のような効果は単に空気中の酸素を遮断することによる切削温度低減だけでは説明することが困難である。特にこのような特異な切削抵抗や工具摩耗低減の原因解明が望まれる。また本手法を旋削加工などの幅広い機械加工へ適用し、これまでに普及しているMQL加工の生産性をさらに高める可能性についての検討が求められる。

2. 研究の目的

本研究ではCO₂ミスト潤滑ドリル加工実験を通じて切削抵抗や切削点温度の解析、切削後の工具摩耗状況解析、切りくず表面に生成する付着物の解析を実施し、CO₂ミスト潤滑切削加工の切削抵抗低減および摩耗低減メカニズムの解明をおこなう。さらに本手法をより多くの機械加工に応用するために外周旋削加工へ適用し、有効性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

CO₂ミスト潤滑ドリル加工実験には小型マシニングセンタ(エンシュウ E130)を、微量油剤供給装置にはプランジャー形精密ポンプ(フジBC技研 BluebeFK1-2)および微量の油剤を工具先端に供給するためのサイドスルーホルダ(NTツールズ)を使用した。実験装置の概略を図1に示

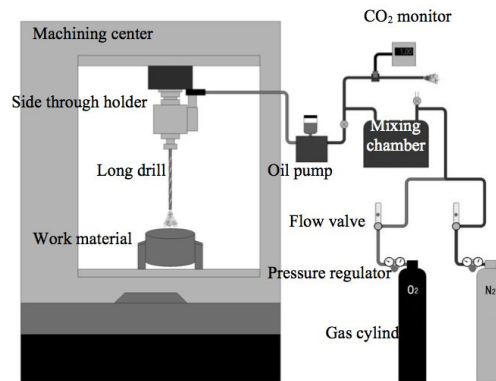


図1 CO₂ミスト潤滑ドリル加工実験装置の概略

す。CO₂ボンベから供給されたガスは微量油剤供給装置に導入し、微量の切削油とともに工具先端に供給した。また工具に供給するガス濃度については二酸化炭素濃度計(理研計器RI-557)により空気の混入がないことを確認した。また実用上の観点から、高価なCO₂ガス使用量低減を図るため、CO₂ガスを安価なN₂ガスで希釈して切削性能を検証する実験も合わせて実施した。本実験では深穴加工実験用工具としてTiN/AlN系多層膜コーティング超硬ソリッドドリル(住友電工ハードメタルHK)を用いた。切削実験条件を表1に示す。加工実験手順は最初に短いドリルで浅いガイド穴加工(5.60×10.0mm)を施した後で、深穴加工(5.55×70.0mm)を行った。被削材は自動車用クランクシャフト加工を想定し構造用炭素鋼(S50C非調質)とした。またミスト油には植物油ベース合成エステル油(フジBC技研LB-10)を用いた。実験では比較のために圧縮空気を用いた通常のみスト加工も実施した。実験では100穴加工ごとに切削工具に作用するトルク、スラストをピエゾ式4分力切削動力計(Kistler9272,5070A)で計測し、ビデオ顕微鏡観察(ハイロックスKH770)による工具摩耗計測を実施した。

表1 CO₂ミスト潤滑ドリル加工実験条件

Cutting conditions	Guide hole	Deep hole
Cutting speed [m/min]	80	55
Spindle speed [rpm]	4550	3156
Drill diameter [mm]	5.60	5.55
Feed [mm/rev]	0.10	0.27
Depth of hole [mm]	10.0	70.0
Oil mist supply [ml/h]	20	

CO₂ミスト潤滑による切りくず表面の酸化やガス吸着状況の変化を検証するため、切りくずの裏面(すくい面と接触した面)についてEPM(島津製作所EPM-1720)による半定量分析を実施した。さらに切

削加工表面の生成物を同定するため原子結合状態計測が可能なXPS（島津-KRATOS XSAM 800 pci）による分析を行った。但し、XPS解析用試料形状の制約から、深穴加工実験による切りくずや加工表面の代わりに、S50C材を油穴付きエンドミルにより切削面にCO₂ミスト潤滑をおこないながら側面加工を行い、その切削面の解析を実施した。なお切削条件はCO₂ミスト潤滑ドリル実験に合わせるため、表1に示した深穴加工と同様にした。

CO₂ミスト潤滑外周旋削実験は普通旋盤（昌運工作所HB-500）に前述のピエゾ式4分力切削動力計を装着し、切削三分力の計測を実施した。被削材には構造用鋼（S45C非調質）を用い、切削工具にはノンコーティング超硬チップ（三菱マテリアルUT120T T NMG160404）を用いた。微量油剤は前述の微量ポンプを用いて工具すくい面と逃げ面の2カ所からミストを供給可能なミストホール付きバイト（フジBC技研PTG NR2020K16-EB）を用いて供給した。切削条件は外周旋削ではドリル加工と比較して加工点温度が低いことを考慮して、ドリルの外周速度よりもやや速い150m/min、送り0.15mm/revとし、切削距離は工具逃げ面摩耗（V_B）が300μmに達するまで実施した。ミスト供給方法はCO₂ミスト潤滑との効果を比較するためにドライ（切削点に何も供給しない）、圧縮空気を用いた通常ミスト加工（以下ミスト）の3条件とし、ミスト流量が一定になるようにガスまたは圧縮空気の供給圧力は全ての条件で0.4MPaとした。



図2 CO₂ミスト潤滑外周旋削実験装置の外観

4. 研究成果

図3にCO₂ミスト潤滑ドリル加工実験結果のうち、5vol%CO₂ガスと95vol%N₂ガスの混合ガスを使用した場合の工具切れ刃逃げ面摩耗の変化を示す。図より明らかに混合ガスミスト加工（図中赤線）の方が圧縮空気を用いた通常ミスト加工（青線）よりも逃げ面摩耗の進行が約50%に抑制されており、CO₂ガス使用量を大幅に削減した条件でも100%CO₂ミスト潤滑と同様の摩耗低減効果があることを見いだした。ここで、生産現場における本ドリルの寿命は1000穴加工時とされ、図3では工具逃げ面摩耗幅が約200μmに達した時に相当することから、混合ガスミスト加工における工具寿命はおよそ4000穴程度と予測され、著しい工具寿命改善効果が見いだされ

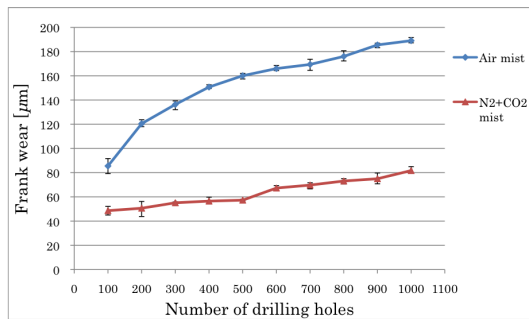


図3 CO₂ミスト潤滑ドリル加工実験装置の概略

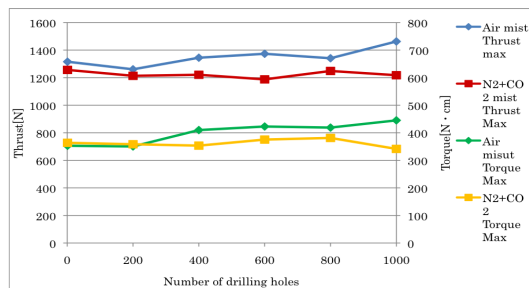


図4 加工穴数に対するドリルに作用する力の変化

た。

図4にCO₂ミスト潤滑ドリル加工実験中におけるドリルに作用するトルク及びスラスト力の加工穴数に対する変化を示す。トルク及びスラストの最大値はCO₂混合ガスミスト潤滑加工（図中赤線および黄線）の方が通常ミスト加工（図中青線および緑線）よりも低い値を示している。また通常ミスト加工では加工穴数の増大とともに両値共に上昇する傾向が見られるが、混合ガスミスト加工では実験を行った範囲において加工穴数に対する変化はほとんど見られなかった。これは圧縮空気ミスト加工では工具逃げ面摩耗の進行が速いため、これに伴って切削抵抗が増大も顕著に発現したためであると考えられる。このように、同一油剤を同量切削点に供給しているにもかかわらず、供給ガスの種類により切削抵抗に明らかな差が見られることが確認された。

表2 CO₂ミスト潤滑ドリル加工切りくず表面の半定量分析結果

Cutting conditions	Conventional mist	CO ₂ driven mist
C [mass%]	1.11	2.16
O [mass%]	4.45	2.17
Fe [mass%]	91.94	93.50
Misc.	2.51	2.16

表2にドリル加工で生じた切りくず表面のEPMAによる判定量分析結果を示す。表より、CO₂ミスト潤滑条件の切りくず表面の炭素量が通常ミスト深穴加工と比較し

て2倍程度に増加している一方、酸素量は半分程度にまで減少していることが判明した。これはCO₂ミスト潤滑では加工点に酸素が少ないため、材料内部から切削によって露出した新生面の酸化が抑制されていることと、それと同時に供給したCO₂ガスが熱的に分解して加工面表面に酸素が供給され、他方で反応性が高いCOガスの作用で新生面表面に炭酸鉄のような通常の切削加工では生成しない化合物が生成していることが示唆される。しかし、本手法による解析では切りくず表面を構成する元素の重量比率が測定されるだけであり、おのおのの元素がどのような状態で存在しているか、すなわち単体か化合物を形成しているか不明である。

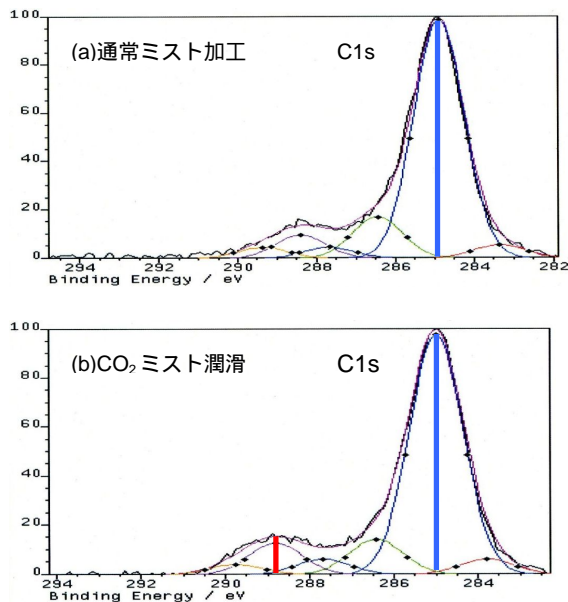


図5 CO₂ミスト潤滑切削加工面のXPS分析 (a)通常ミスト加工 (b)CO₂ミスト潤滑切削加工

図5に油穴付きエンドミルにより加工点にCO₂ミスト潤滑をおこないながら側面加工を行った切削面のXPS分析結果のうち炭素原子の1s軌道電子エネルギースペクトルを示す。XPS分析では表面の数nmという狭い領域からの情報を得るため、試験片は測定前にアセトンによる超音波洗浄とアルゴンスパッタクリーニングを施し、表面の汚染を除去している。図5(a)および(b)を比較すると、285 eVに強いピーク(図中青線)がいずれも観察されていることがわかる。これは炭素と水素の結合(C-H結合)に由来し、加工面表面に残留している切削油などの不純物に由来すると考えられる。一方、289 eVのピーク(赤線)は(a)から(b)で明らかに増大していることが見て取れる。このエネルギーはCO結合、C=O(二重結合)に対応すると考えられ、CO₃化合物の存在を示唆するデータであり、加工点にCO₂ガスを供給した結果、このような化合物形成が促進されたと考えられる。図6に同様の方法で測定した切削面の酸素原子の1s軌道電

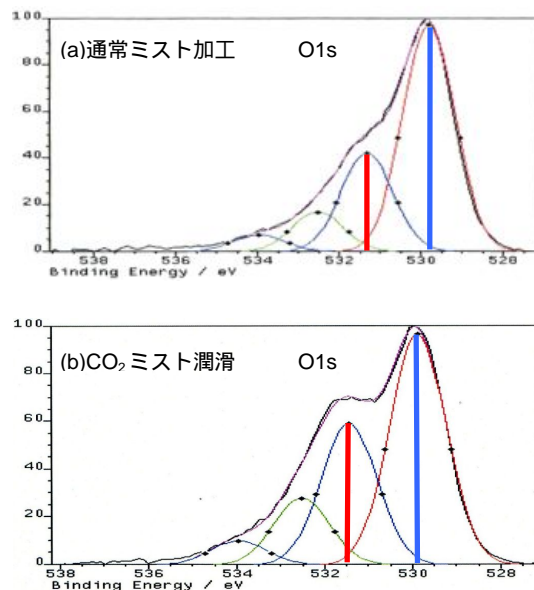


図6 CO₂ミスト潤滑切削加工面のXPS分析 (a)通常ミスト加工 (b)CO₂ミスト潤滑切削加工

子エネルギースペクトルを示す。図中530 eVのピーク(青線)は通常ミストとCO₂ミスト潤滑で同様に出現し、Fe₂O₃生成に起因すると考えられる一方で、531.6 eVのピーク(赤線)は(b)の方がより強く現れていて、本ピークはFeCO₃に対応することから、先のEPMAのデータと合わせCO₂ミスト潤滑切削加工では加工表面や切りくず表面の鉄原子が通常の酸化反応だけではなく、切削点に供給したCO₂と化学反応を起こし、通常は生成しないFeCO₃がより多く生成している可能性が高いことが明らかとなった。このような化合物は鉄の酸化物と同様に摺動面の摩擦係数を下げる効果があることが知られていることから、CO₂ミスト潤滑ドリル加工によりドリルに作用する切削抵抗が低減し、工具寿命が改善するメカニズムは加工面にFeCO₃が大気中加工よりも多く生成するためであることが明らかになった。

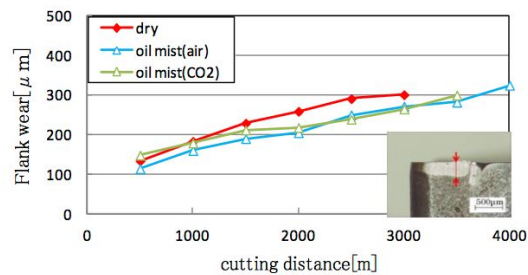


図7 CO₂ミスト潤滑旋削加工時の逃げ面摩耗幅

図7にCO₂ミスト潤滑外周旋削実験の結果から工具横逃げ面摩耗の切削距離に対する変化を示す。図中通常のみスト潤滑加工(青線)はドライ切削と比較して工具摩耗低減が認められる一方で、CO₂ミスト潤滑(緑線)と通常のみスト潤滑との間に有意な差は

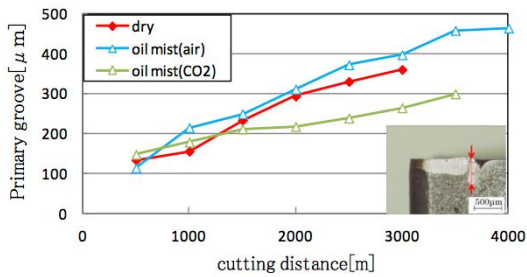


図8 CO₂ミスト潤滑旋削加工時の境界摩耗幅

認められなかった。その一方で工具横逃げ面の境界摩耗幅の計測結果(図8)ではCO₂ミスト潤滑(緑線)の摩耗低減効果が認められた。ドリル加工実験結果とは明らかに異なる実験結果となり、旋削実験では切削工具寿命を決定づけると考えられる逃げ面摩耗低減効果が認められないことが明らかとなった。この理由として、ドリル深穴加工で工具内部からCO₂ミスト潤滑をおこなうと、加工点に大気が入る可能性が少なく、供給したガス雰囲気容易に得られると考えられるのに対し、旋削加工では加工点にすくい面と逃げ面からCO₂ミストを噴射する際に、一定量の大気を巻き込みやすく、加工点を供給ガス雰囲気に出来ないためである可能性が高いことがわかった。生産現場に本手法を適用する上で、最も設備投資が透くなる方法として今回はノズル付きバイトを利用したが、これに加えて切削点を簡易的に覆うようなシュラウドを設置して大気の巻き込みを防ぐなどの対応が必要であることがわかった。

以上より、自動車部品生産に広く用いられているMQLドリル加工の工具寿命改善方法としてCO₂ミスト潤滑が有効であること、さらに供給ガスを純粋なCO₂ガスから濃度5%程度のN₂混合ガスに変更しても依然として摩耗低減効果があること、さらに本効果は加工点近傍の切りくずや加工面表面に通常よりも多量のFeCO₃が生成しているためであることが明らかになった。また、本手法はドリル加工やエンドミル加工で工具内部からミスト潤滑を加工点に供給する場合に顕著な効果が見られた一方で、旋盤加工のように加工点が開放状態にある場合には逃げ面摩耗低減効果を引き出すためにさらに工夫が必要であることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Katsuhiko SAKAI, Yasuo SUZUKI, Hiroshi SUYAMA and Kouki KANEDA, Environmentally Conscious Deep Hole Drilling using Oil Mist Carried by Mixed Gas, The 6th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, 2011, p.3257
査読有

[学会発表](計4件)

田中弘志・酒井克彦・静 弘生, CO₂雰囲気中ミスト加工における工具摩耗低減効果に関する研究, 精密工学会2014年春期大会学術講演会, O65

酒井克彦, 金田悠熙, 岩崎智典, 鈴木康夫, 混合ガスキャリアを用いたミスト深穴加工の切削加工特性(切削誘起トライボロジ効果の検証), 日本機械学会 第9回生産加工・工作機械部門講演会, 2012, D32

陶山博史, 桑嶋和宏, 酒井克彦, ステンレス鋼 SUS304 のドリル加工における基礎的特性とMQLの適用についての検討, 精密工学会2012年秋期大会学術講演会, N15

金田悠熙・酒井克彦・鈴木康夫, CO₂ガス援用によるミスト深穴加工に関する研究, 精密工学会2010年秋期大会学術講演会, C63

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 克彦 (SAKAI, Katsuhiko)

静岡大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 80262856

(2) 研究分担者

鈴木 康夫 (SUZUKI, Yasuo)

静岡大学・工学部・名誉教授

研究者番号: 80091148