



環境にやさしく高能率な セミドライ (MQL) 加工の実際

～高硬度鋼の金型加工、小径深穴加工の事例から見る現場の課題解決～

フジBC技研 井上 勤
精密工学会誌 2011年 Vol.77
(太田昭夫) より再編集

■序論 エコブースタ開発～セミドライ元年～現在に至るまで

セミドライを主軸スルーやNC旋盤等の回路からの吐出を可能にし、環境にやさしく、生産性を向上させる。弊社の井上らは、環境に対する需要の高まりや、生産性の向上に不可欠なNCマシンへのセミドライ適応に着手し、1997年に主軸スルーからのミスト吐出(セミドライ化)が可能な内部給油装置「エコブースタ」を開発した(図1)。一般的に、流体中の油分は回転体や複雑な回路では、切削点に届きにくい。これは、高速回転下の遠心力や複雑な回路中の液状化のためである。そのため、セミドライはマシニングへの適用が困難とされてきたが、エコブースタはその概念を変えた。弊社は加工開発も同時に実施し、鋼材、鋳物、アルミ等の外径旋削、穴明け、タップ、正面・側面ミーリング加工を、エコブースタと工作機械への適用について研究した。開発の結果、1998年の第19回国際工作機械見本市(JIMTOF)にお



図1 内部給油装置「エコブースタ」

いて「エコブースタ」を搭載した逆立ち旋盤を企画開発、展示し、鋼材に直径20mm 深さ40mmのセミドライ高能率穴明け加工を行った。セミドライ機器を搭載した多くの工作機械も出展され、環境対応技術セミドライ元年などと言

われ大きな反響を得た。なお、切削工具メーカーでは今後の加工技術の方向性を指し示すものとして、セミドライに対応できる工具の開発検討に上がり、結果的に現在のセミドライ普及の大きな基礎となった。

■セミドライ加工が環境にやさしい理由

セミドライ加工とは、植物油など生分解性があり環境に優しい高潤滑性油剤などを1時間あたり数mLの吐出量で加工点に的確に供給する加工技術である。MQL、NDM、オイルミストなどと呼ばれることもある。加工条件に必要な最低限の油剤が供給されるため、切りくずは乾燥状態で排出される。その特性を水溶性切削油剤(ウ

表1 ウエット/セミドライの特性比較

	ウエット	セミドライ
吐出単位	L/min	m L/h (ウエットの1/60,000)
供給方法	循環使用(スラッジ有)	新油使用(スラッジ無)
消費電力	クーラントポンプ	圧縮エア
廃油・廃液	あり	なし
切りくず	濡れている	乾いている
作業環境	悪い	良い

エット)とセミドライで比較した(表1)。当社は1989年からアメリカの航空機産業の部品加工で使用されていたセミドライ給油装置の輸入・販売を開始し、冒頭で述べたエコブースタの開発によりセミドライの市場を開拓した。2010年には、20余年のセミドライ加工技術の普及営業活動が認められ「金属産業での生産性向上と環境対策を両立するセミドライ加工法」として愛知環境賞・銅賞を受賞した(図2)。



図2 愛知環境賞

■セミドライ給油装置

セミドライ給油装置には供給方法で外部給油装置と内部給油装置がある。外部給油装置はパイプや専用ノズルにより外部から油剤とエアを供給する方法で、切断機や専用機、くし歯型旋盤、小型機械に広く採用されている。内部給油装置エコブースタはマシニングセンタなどの主軸内部からの油剤供給を可能としたもので、切削工具のオイルホールやコレットスルーから油剤が吐出される。また、供給回路の複雑なタレット型NC旋盤なども採用されている。これはエコブースタが、搬送性の高いミスト生成と付着性の高いミストを生じさせる機構による。エコブースタは、1～2μmの微細なミストを装置内で生成し、工具などに設けられたオイルホール(油穴)と装置間の差圧により高速回転下にあっても工具先端までミストを搬送する。更に、主軸から工具オイルホール径を通過することで粒子間の衝突を発生させ、ミスト粒径

を 4 μm 以上の付着性の高い状態にし、ミストが被削材に付着するようにした。エコブースタは、搬送性と付着性の高いミストを同時に実現できる機構で、加工点に潤滑を安定供給できる。

■セミドライ加工導入の歴史

(1) アルミの切断工程

セミドライの販売当初はアルミの切断工程において多用されてきた。シャーリングによるピレット切断（鍛造材料の素材）、チップソー（超硬丸鋸）によるアルミ鋳物・ダイカストの湯口・アルミサッシの切断工程に普及が進んだ。これは、高い潤滑性と切りくずの除去により、シャー刃・チップソー工具寿命の大幅な延長と、切りくず清掃の効率化、洗浄・乾燥レスで切りくずの再溶解が可能、といった作業環境の改善など大きなコストダウンをもたらした所以である。

(2) 金型加工の事例

金型加工技術は、従来は生材を切削加工し、焼き入れ、磨き工程をしていたが、予め焼き入れ済みの高硬度鋼を直彫りする新金型技術が普及した。金型加工に特化した工作機械メーカーである安田工業などがセミドライを採用し、HRC50 程度の鍛造型など高能率・高品位加工技術が普及した。また近年では、金型加工は高速化し、高回転、低切り込み、高送り加工が主流である。こうした加工方法は、切り屑に熱を逃がすとともに熱発生を抑制

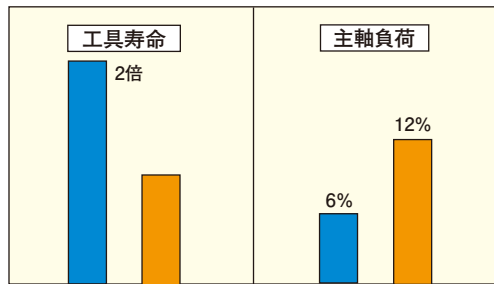


図3 ボールエンドミル加工の工具寿命と主軸負荷
超硬ボールエンドミル加工、ダウンカット、Vc=125m/min、f=300mm/min、a=0.1mm、SKD61(HRC40)、超硬ボールエンドミル R5、給油機ブルーベ JK2/ 油剤ブルーベ LB-1

し、熱変異による製品の精度劣化を防止している。この発熱を抑えた加工方法は、セミドライ加工との相性が良い。図3はボールエンドミル加工のセミドライとドライ（エアブローのみ）の比較データであり、初期型リニア採用の高速マシニングセンタを使用している金型工場が主軸負荷低減のためにセミドライを採用した。エアブローのみのドライ加工と比較し、主軸負荷が半分に低減するとともに、ボールエンドミルの寿命は倍増した。また、仕上げ面が非常に美しくなり、磨きレスに近いところまで向上した。図4は新品のボールエンドミルで同じ金型を、セミドライと水溶性切削油で加工した後のボー

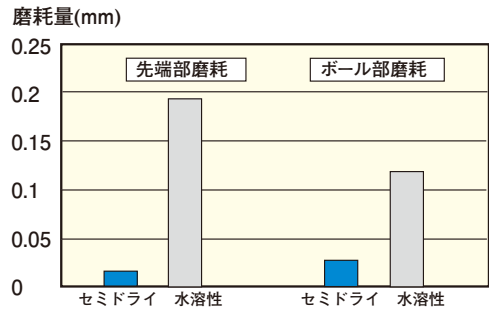


図4 ボールエンドミル磨耗量
超硬ボールエンドミル R3 × 6、被削材 HPM1、N=10000min⁻¹、F=2000mm/min、AD=1.0mm、RD=0.5mm

ルエンドミルの磨耗量を比較したものである。その結果、セミドライを使用したときの方がボールエンドミルの磨耗量のはるかに少なかった（磨耗量はボール部と先端部の2点測定）。特に、先端部の磨耗が少なく抑えられた。一般にボールエンドミル先端部は切削速度が上がらずに超硬工具の適正速度を下回る低速加工となるため磨耗が

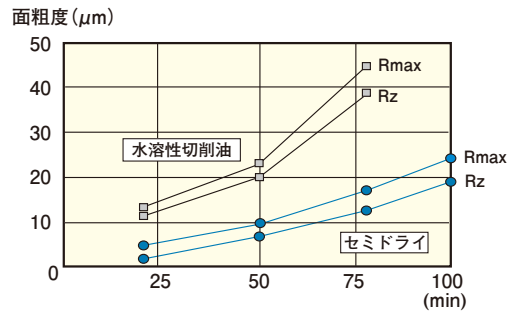


図5 ボールエンドミル面粗度
超硬ボールエンドミルφ12、被削材 SCM440相当(HRC29-30)、a=0.2mm

速い。その部分に高潤滑な油剤を連続的に塗布することで、磨耗を抑制したと思われる。図5は水溶性切削油とセミドライの面粗さの比較である。水溶性切削油と比較し、面粗さを良好に保っている。加工時間に比例して面粗度が落ちていくことから、面粗度はボールエンドミルの磨耗量と相関していると思われる。図4で見たように、セミドライによる磨耗の抑制効果が直接面粗さに出ていると思われる。HRC62.5の焼入れ鋼の直彫り加工例では（図6）、水溶性切削油、ドライ加工と比較し、セミドライの工具寿命が延びていることがわかる。高硬度鋼のエンドミル加工に効果を発揮し、セミドライの採用が増えている。

セミドライは、金型加工の工具寿命の延長と面粗さの向上に大きな効果がある。紹介したデータはフィールドデータであるため完全なものではないが、金型製造の短納期対応やコストダウンにも大きく寄与している。事実、MQLセミドライ加工によるボールエンドミル加工に関しては、研究者によるデータが発表されており（注1）、ドライや水溶性切削油と比較し、工具磨耗の点でセミド

ライ加工が優れていると報告されている。
 (注1: 狩野勝吉著「データで見る次世代の切削加工技術」
 2000年、日刊工業新聞社)

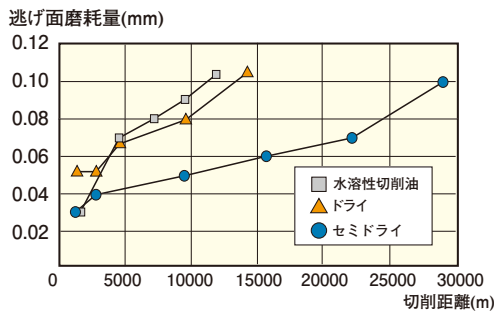


図6 高硬度鋼のエンドミル加工と逃げ面摩耗
 エンドミル側面加工、ダウンカット、 $V_c=30\text{m/min}$ 、 $f=214\text{mm/min}$ 、SKD11(HRC62.5)、
 超硬エンドミルφ10 6枚刃、寿命判定VB=0.1mm

(3) クランクシャフトの小径斜め深穴加工の高能率化

弊社は、2001年から自動車・工具メーカーと共同で小径深穴のセミドライ加工を研究している(図7)。自動車エンジンの中心部にピストンを連結するクランクシャフトが組み込まれており、このクランクシャフトの



図7 クランクシャフト小径深穴加工 油剤吐出はイメージ

中心部にジャーナル、ピストンの組みつけられる偏芯部にピンと呼ばれる回転部があり、それぞれメタルベアリングにより保持されている。このメタルベアリングを潤滑するために直径5~6mm、深さ100~150mmの斜め小径深穴がある。従来はガンドリルによる加工が一般的であり、高価なガンドリル専用機と1回転送り0.03~0.04mm/revの遅い送り量であった。セミドライによる新加工技術を用いたラインでは、クランクシャフトに特化したマシニングセンタの導入により費用の大幅削減となった。加工能率はセミドライと油穴付き超硬ツイストロングドリルの併用により、5倍以上の能率化、設備台数は1/5以下のコストダウンをもたらしている。これは、小径深穴加工において、加工点はエアの断熱膨張により適度に冷却され、適温の加工点で分断・排出性に優れたコンパクトな切りくずが生成されるためである。

ツイストドリルの油穴の圧力損失は高く、セミドライ加工では油剤の搬送キャリアが圧縮エアのため、ウェットよりも圧力損失が低い。そのため、吐出口で解放された圧縮エアが一気に膨張し切りくずを排出させ、高能率加工を実現する。従来の高圧クーラントと比較しても、電力量が大幅に削減可能となり、切削油剤の腐敗による交換も廃液も無いため産業廃棄物の処理費用の発生もない。ランニングコストは従来のウェット加工の半分以下との事例もある。高能率で省電力、廃液レスのセミドライ穴明け加工はさまざまな自動車産業で普及しており、送り量の最大値では現在、0.35mm/revが報告されている。

特に不二越製のMQLパワーセルマシニングセンタ「DH524」、「DH514」はクランクシャフト加工に特化した機械である。省スペースでありながら直線軸X・Y・Z、回転軸A・B軸を持ち、クランクシャフト全ての穴明けを可能とし、弊社エコブースタが標準搭載されている。中・小型エンジンのクランクシャフトは、この機械仕様で殆ど加工が可能である。国内のクランクシャフト小径深穴明け工程はセミドライに置き換わり、現在では他の国内メーカー含め、海外工場向け、海外自動車メーカーの採用が進み、セミドライ・エコブースタがクランクシャフト加工の世界標準になっている。

■なぜ植物性の油剤か

弊社のセミドライ油剤は人体に安全で生分解性の高い植物油剤をベースとしている。植物油剤は引火点も高く、一部純正油剤で消防法第4類第3・4石油類の適用油剤もあるが、弊社の代表的な純正油剤「LB-1」「LB-7」は引火点が250度以上で、可燃性液体として区分され、消防法の数量指定にカウントされない。過去、旋盤職人がナタネ油をハケ塗りしながら加工していたように、植物油剤は添加物なしで生来の潤滑性の高さがある。これに対して鉱物油は化学的吸着性に劣るが、ベースオイルとして各種添加剤を受け入れやすい性状があり広く切削油剤として使用されている。植物により発生した二酸化炭素は再生の過程で植物に吸収される。「カーボンニュートラル」の言葉が示すように、植物由来の燃料、油剤などは最終の焼却処理をしても二酸化炭素の排出がないとされている。鉱物油剤は1トンの油剤を購入すれば3トンの二酸化炭素発生となるため、「カーボンニュートラル、二酸化炭素レス」の環境にやさしい植物油剤への期待は大きくなってきている。

■最近の加工事例

(1) スロアウェイドリルによる鋼材の高能率加工

小径穴では前述のようにセミドライと油穴付き超硬ドリルにより高能率化は実現している。中径穴ではスロア

セミドライを用いた高硬度鋼の金型・小径深穴の事例

ウェイドリルによる加工が一般的であるが、単位時間あたりの切りくず排出量が多くセミドライでは冷却性に問題がある。弊社では、油剤と圧縮エアによるセミドライ加工の冷却性を補完するために水溶性切削油剤（クーラント）を同時に供給する「クーラントミスト装置」も販売している。直径 20mm のスロアウェイドリルと「クーラントミスト装置」による鋼材の高効率穴明け加工の事例を表 2 に示す。穴明けは 100 穴の連続加工、切りくずが比較的切れにくい一般構造用圧延鋼材 SS400 では高い切削速度と低送りで薄い切りくずを生成して遠心力で分断している。切りくず処理性のよい炭素鋼 S50C では水溶性クーラントの条件を基準に直径 20mm、深さ 60mm を 1 穴 5 秒の高速加工を実現している。

また、昨今の廃液レスのニーズや、製品形状などに由来するクーラントの使用が制約され、クーラント、クーラントミストを使用しないドライ加工を目指す企業も増加している。しかし、完全なドライ加工では生産性が向上しない。そのため近年はインサート自身の耐熱性の向上もあるが、油性ミスト装置エコプースタ EB7 を用いたセミドライ化・生産性向上の成功事例も増加している。

表 2 鋼材の高効率穴明け加工 φ 20 止まり穴 100 穴連続

被削材	S50C	SS400
工具	φ 20 スロアウェイドリル	
加工深さ L	60mm	40mm
切削速度 Vc	250m/min	400m/min
回転速度 n	4,000min ⁻¹	6,370min ⁻¹
送り量 fz	0.18mm/rev	0.05mm/rev
送り速度 f	720m/min	320m/min
加工時間 Tc	5 秒/穴	7.5 秒/穴
セミドライ給油機	クーラントミスト	

(2) 極小径深穴加工 (Φ 1.5, L/D=18)

鏡面性の高い樹脂金型鋼の NAK80 (HRC40) にノックピン穴を模して「エコプースタ」を使用し、直径 1.5mm 深さ 28mm 穴 (L/D=18) をノンステップで加工をした。1 穴 8.5 秒の時間で連続 340 穴の加工ができた。また、PX5 (HRC30 程度) では、1 穴 3.4 秒の時間で連続 470 穴の加工ができ (表 3、図 8)、セミドライによる高効率加工を実現した。

表 3 極小径 (φ 1.5×28mm 深さ、L/D=18) セミドライ加工事例 (ノンステップ / 連続加工)

被削材	NAK80	PX5
硬度	HRC40	HRC30
加工穴数	340 穴	470 穴
切削速度 Vc	47m/min	56.5m/min
回転数 n	10,000min ⁻¹	12,000min ⁻¹
送り速度 f	0.02mm/rev	0.042mm/rev
セミドライ装置	EB7EPCB(1 次圧 0.8MPa/Pump Shot 0.5Hz)	
セミドライ油剤	Bluebe LB-10	
油剤塗布量	約 30mL/h(オイルホール+コレットスルー)	

(3) SUS410 R6 ボールエンドミル 3 次元加工

タービンなどに使用される耐熱ステンレス鋼 SUS410

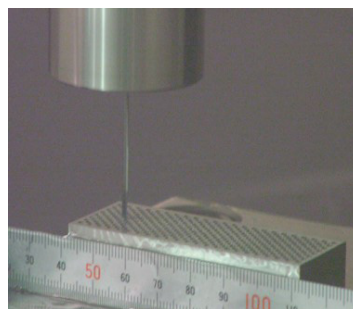


図 8 NAK80 の加工の様子 (セミドライ)

を 2 刃超硬コーテッドボールエンドミルにより 30 度傾斜面の 5 時間連続加工を行った (表 4)。セミドライと水溶性クーラントの加工後の刃先逃げ面摩耗は、5 時間加工後の時点では、ほぼ同等の 80μm であった (図 9)。1 刃送りにより形成されるカッターマークのライン (水平方向) はセミドライでは直線であるが水溶性クーラントでは鋸歯状となっており、また部分的にも白濁していた (図 10)。セミドライによる面品位向上の効果が認められる。

表 4 SUS410 30 度傾斜面 5 時間連続加工 (セミドライの要件)

被材料	SUS410
工具	R6 超硬ボールエンドミル 2 枚刃
切削速度 Vc	200m/min(30 度加工点)
送り量 fz	0.1mm/rev
軸方向切込み量	1mm
ピックフィード	1mm
セミドライ装置	EB7EPCB(1 次圧 0.8MPa/Pump Shot 0.5Hz)
セミドライ油剤	Bluebe LB-10

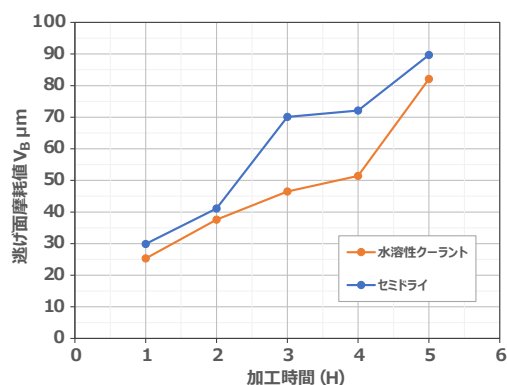


図 9 SUS410 R6 超硬ボールエンドミル加工 Vc200 fz0.1 pf1.0 ad1.0 傾斜各角 30 度

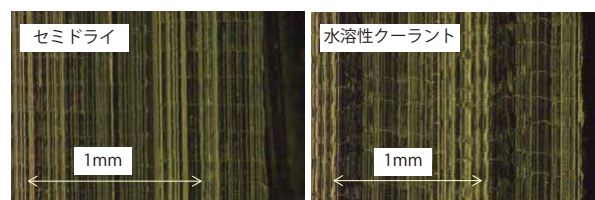


図 10 SUS410 加工面拡大