

重点共同研究（航空宇宙分野）

難削材のエンドミル加工への MQL の適用

近藤 弘康* 稲澤 勝史* 曾田 将来*
高野 直史** 小嶋 広光** 小松 弘樹**

Application of Minimum Quantity Lubrication
to End Milling of Difficult-to-Cut Materials
KONDO Hiroyasu, INAZAWA Katsufumi, SOTA Masaki,
TAKANO Naofumi, KOJIMA Hiromitsu and KOMATSU Hiroki

本研究では、MQL を用いてチタン合金のエンドミル加工における工具の長寿命化を実現するため、エンドミルとノズルの距離や切削方向に対するノズルの方向が工具寿命に及ぼす影響を調査した。その結果、一定以上ノズル距離が長くなるとオイルミストの効果が損なわれ急激に摩耗が進行することや、刃先が被削材から離脱してからオイルミストが作用するまでの時間が長いノズル方向ではオイルミストの効果が低減することが明らかになった。そして、航空機部品の実加工を想定した加工モデルに対して MQL の適用を行った結果、加工機の差異に関係なく高圧クーラントに比べ 10 倍以上の長寿命を実現した。

Key words: MQL, エンドミル加工, チタン合金, 工具摩耗, 航空機部品

1 はじめに

ボーイング 787, エアバス 350 等の新型航空機では、CFRP の利用増に伴い、熱膨張率や電蝕の問題から CFRP と接する金属部材にチタン合金が多用されている。

チタン合金やステンレス鋼などに代表される難削材は熱伝導率が小さく、刃先温度が高温になる等の要因のため、工具寿命が著しく短く、部品製造コストにおける工具費の割合が高くなっており、工具の長寿命化によるコスト低減が求められている。

航空機部品サプライヤが難削材の切削加工を行う際、切りくず排出や冷却を目的として高圧クーラントを用いた加工が行われているが、更なる工具の長寿命化のため、微量の切削油剤を圧縮空気とともにオイルミストとして供給する MQL (Minimal Quantity Lubrication) 加工が着目されている。これまで MQL の作用メカニズムや難削材に対する適用例が報告され、チタン合金を対象としたエンドミル加工において、MQL 加工が水溶性油剤による湿式加工よりも長寿命である結果¹⁾が得られており、有効性が期待できる。

しかしながら、高圧クーラントと MQL を比較した報告や、オイルミストノズル（以下、ノズル）の設置条件と工具寿命の関係を調査した報告は少なく、MQL 導入効果や現場における段取り方法が不明であるため、県内中小

企業における難削材への MQL の適用は一部の加工に留まっている。

そこで本研究では、MQL におけるエンドミルとノズルの距離（以下、ノズル距離）や切削方向に対するノズルの方向（以下、ノズル方向）が工具寿命に与える影響を実験的に明らかにすることで、MQL を現場に適用する方法を検討し、チタン合金のエンドミル加工における工具の長寿命化を目指した。

2 研究の方法

2.1 ノズル距離と油付着量

エンドミル加工に外部給油方式の MQL を適用する場合、加工機の主軸にノズルを設置し、エンドミルから一定程度離れた位置からオイルミストを供給する方法が想定される。

その場合、オイルミストの効果をj得るためにはノズル距離を可能な限り近づけることが望ましいが、ノズル距離が短くなると部品へのノズルの干渉や自動工具交換装置(ATC)を用いた際の衝突が懸念される。そこで、ノズル距離を変えた際の油の付着量を把握するため、ろ紙と精密はかりを用いた油付着量計測を実施した。

オイルミスト装置(フジBC技研 Bluebe Model FK)を用いて、圧縮空気流量 100L/min, エアー圧力 0.6MPa, 供給油量 30mL/h の条件で、ノズル距離を 10mm から 150mm まで 20mm 間隔で変え、φ6mm のろ紙に 3 秒間オイルミ

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

** 東都工業株式会社

ストを吐出させた際のろ紙の重量変化を測定した。

なお、ろ紙はアドバンテック東洋 定量ろ紙 No. 5C, 精密はかりはメトラー・トレド AT400 を用いた。

2. 2 ノズル設置条件と工具寿命

部品のエンドミル加工を行う際、部品形状に伴って様々な方向から切削を行う必要があるため、外部給油方式のMQLを適用する場合、加工パスに応じてオイルミストの供給方向が変化することが考えられる。

そのため、ノズル距離及びノズル方向を変えた際の工具寿命を把握するため、5軸マシニングセンタ (DMG 森精機 DMF180) を用いて、64チタン圧延材 (AMS4911) の摩耗試験を実施し、摩耗幅と切削力を評価した。

工具・切削条件については航空機部品の中仕上げ加工を想定して表1のとおりとし、MQLのノズル距離は50mm, 90mm, 120mm, 150mmの4条件で試験を行った。ノズル方向は図1のとおり、エンドミルの進行方向に対して前方からオイルミストを当てる方向を0°として、0°, 180°, 270°の3条件で試験を行った。

また、ノズル角度は図2のとおり30°とし、前項と同様に圧縮空気流量100L/min, エアー圧力0.6MPa, 供給油量30mL/hの条件で、オイルミストを供給した。

なお、摩耗幅はマシニングセンタ内に固定したカメラを用い、各切削距離の刃先の定点観察像から算出した。

表1 工具・切削条件

工具	径	10mm
	形状	ラジアスエンドミル(R1.0)
	コーティング	TiAlN
	母材	超硬
	刃数	2枚刃
切削条件	切削速度	100mm/min
	1刃切込み	0.1mm/tooth
	軸方向切込み	3.0mm
	半径方向切込み	1.0mm
	給油方法	MQL, 高圧クーラント

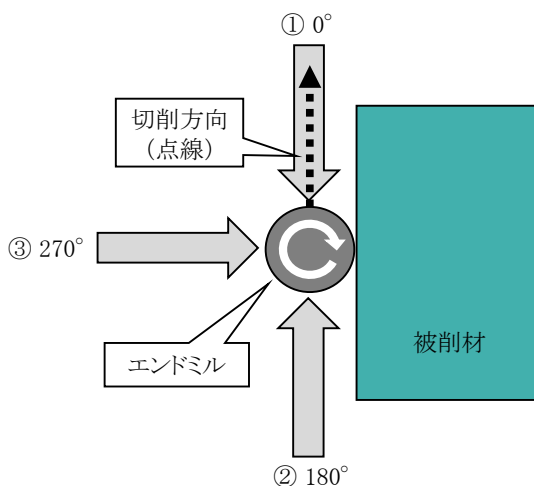


図1 ノズル方向

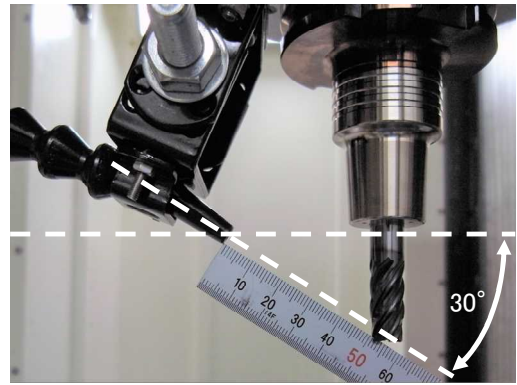


図2 ノズル角度

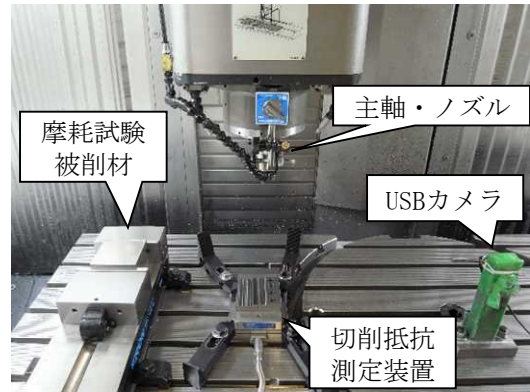


図3 摩耗試験時の構成

切削力は切削抵抗測定装置 (日本キスラー 9257B) を用いて測定した。加工機上における摩耗試験時の構成を図3に示す。

2. 3 MQLの現場適用方法の検討

航空機部品の実加工を想定し、図4に示す加工モデルに対して、高圧クーラントよりも長寿命が期待できるノズル設置条件 (ノズル距離・ノズル方向) について検討を行った。

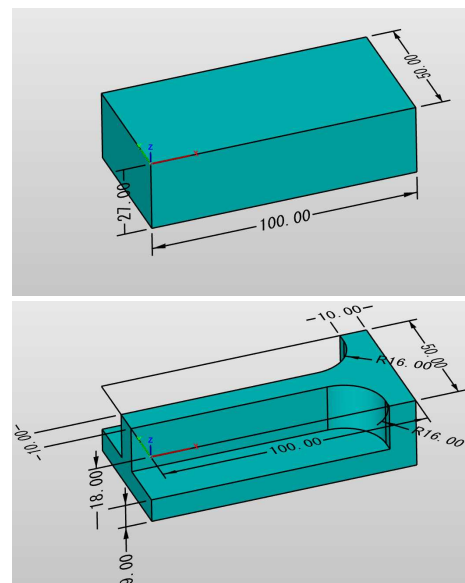


図4 MQL適用対象の加工モデル (上: 被削材, 下: 加工モデル)

2. 4 実証試験

前項で検討したノズル設置条件のMQL加工の効果を確認するため、マシニングセンタを用いて、図4の加工モデルを多数個切削し、摩耗幅の測定を行った。ここで、実験については機差の影響も検討するため、2つの異なる加工機 (DMG 森精機 DMF180, 牧野フライス a61nx) を用いた。それぞれ、加工機 1, 加工機 2 と呼称する。

加工パスについては、図5のとおり輪郭加工のオフセットを20回行うとともに、軸方向切込み3mmを6段行うことで、側面切削の中仕上げ加工を繰り返し行うパスを用いた。なお、切削長については、加工モデル1個につき20.2mの長さとなる。

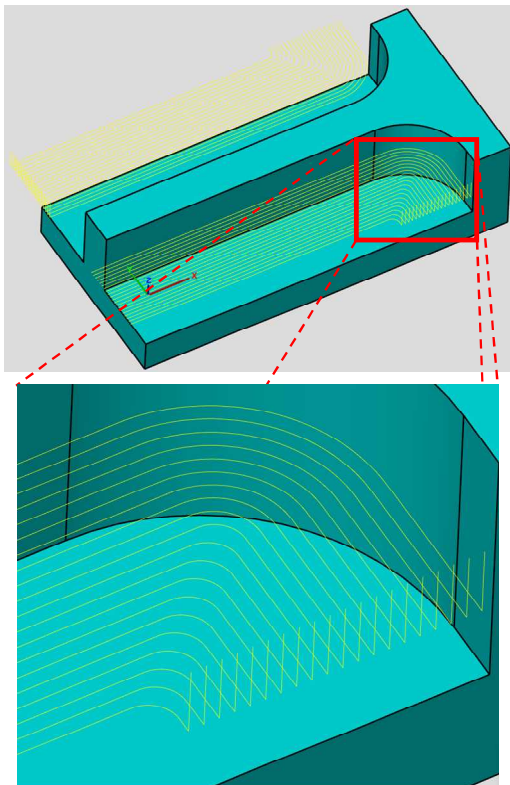


図5 実証試験加工パス 1 段目
(上：全体，下：拡大)

また、被削材は64チタン圧延材 (AMS4911) とし、工具・切削条件については表1のとおりとし、ノズル距離は50mm、ノズル角度は30°とした。なお、オイルミスト供給条件及び摩耗幅の算出については2.2と同様の条件・手法を用いた。

3 結果及び考察

3. 1 ノズル距離と油付着量

ノズル距離と油付着量の関係を図6に示す。ノズル距離10mmと30mmでは殆ど付着量は変わらない一方、50mm以降は大きく低下する結果となった。これは、ノズル距離が遠くなるにつれて、オイルミストが円錐状に広がる

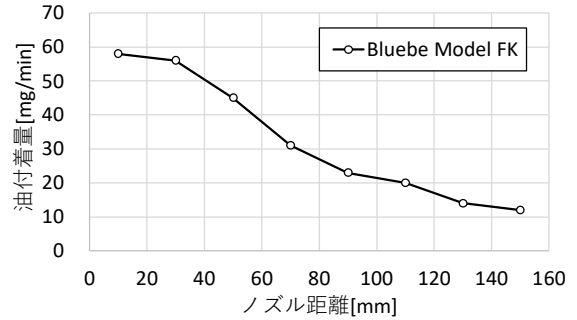


図6 ノズル距離と油付着量の関係

ことに伴い、単位面積あたりの油量が低下したものと考えられる。

以上のことから、ノズル方向10mm・30mmに比べて油付着量が低下する50mm以降を工具寿命の調査対象とした。

3. 2 ノズル設置条件と工具寿命

ノズル方向180°における切削距離に対するノズル距離と摩耗幅の関係を図7、ノズル距離と切削力の関係を図8に示す。ノズル距離50mm・90mmは切削長10m以降、摩耗の進行が抑制され、高圧クーラントに比べて摩耗幅が小さい傾向を示した一方、120mm・150mmは早期に摩耗が進行し、試験継続が困難になった。この結果から、オイルミストの効果を得られる場合は摩耗進行を大幅に抑制するものの、一定以上ノズル距離が長くなると、オ

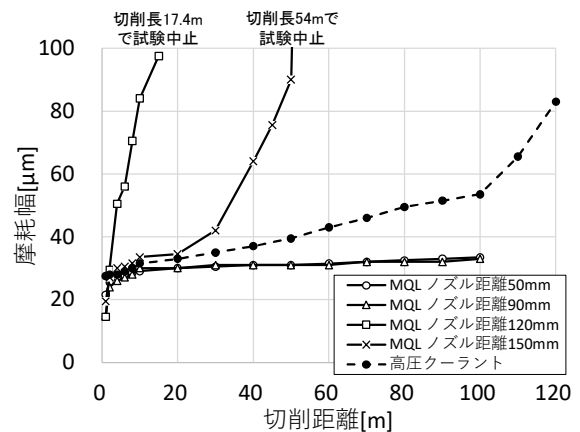


図7 ノズル距離と摩耗幅 (ノズル方向180°)

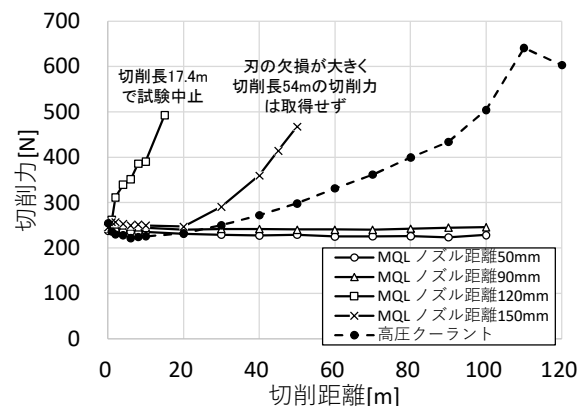


図8 ノズル距離と切削力 (ノズル方向180°)

イルミストの効果が損なわれ、急激に摩耗が進行することが伺える。

次に、ノズル方向 180° にてオイルミストの効果が得られたノズル距離 50mm と 90mm において、ノズル方向を比較した結果を図 9～12 に示す。ノズル距離 50mm の場合、すべての方向で切削長 10m 以降摩耗の進行が抑制され高圧クーラントに比べ摩耗幅が小さい傾向を示した。一方、ノズル距離 90mm の場合、ノズル方向 180°、270° は摩耗の進行が抑制されたが、0° は早期に摩耗が進行する結果となった。

笹原らは、刃先が被削材から離脱した直後の位置で圧縮空気を噴射すると、切削で生じた凝着物が温度低下により固着する前に除去が可能であると推測しており²⁾、今回の試験において、刃先が被削材から離脱した後、オイルミストが作用するまでの時間が長いノズル方向 0° では、凝着物を除去できず、工具と切りくず、被削材間に凝着物がかみ込み、摩耗を促進した可能性が考えられる。

なお、ノズル距離 50mm においてノズル方向 0° で摩耗の進行が抑制されている点については、90mm に比べてノズル距離が近くなることで、単位面積あたりの油供給量が多く、かつエアーストが大きいいため、刃先の温度が一定程度低下し、効果的に凝着物を除去できたものと考えられる。

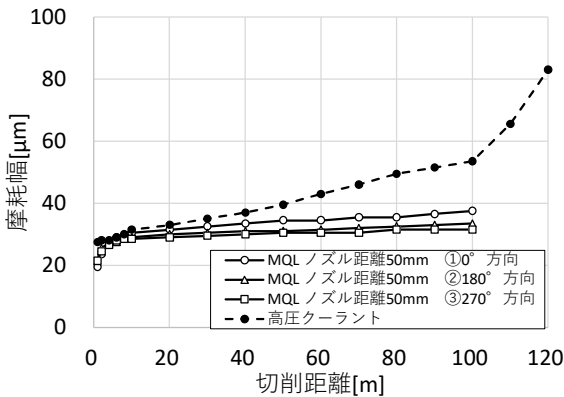


図 9 ノズル方向と摩耗幅 (ノズル距離 50mm)

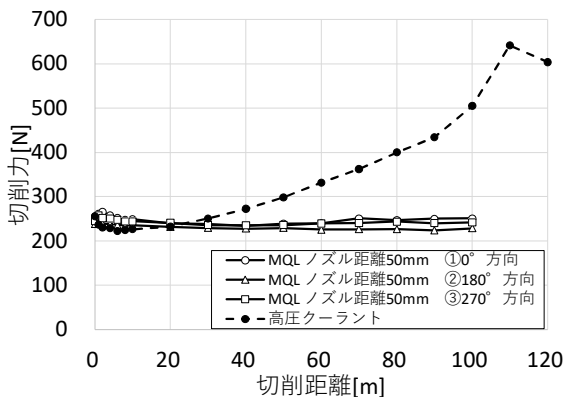


図 10 ノズル方向と切削力 (ノズル距離 50mm)

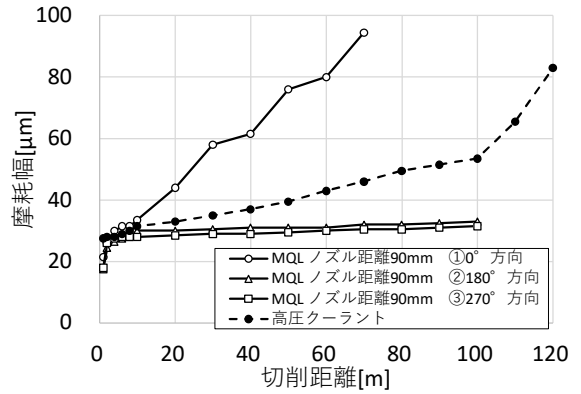


図 11 ノズル方向と摩耗幅 (ノズル距離 90mm)

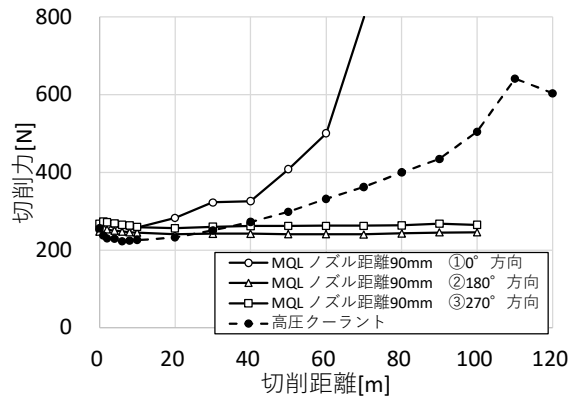


図 12 ノズル方向と切削力 (ノズル距離 90mm)

3. 3 MQL の現場適用方法の検討

図 4 に示す加工モデルに対して MQL を適用する場合、モデルの立壁によりオイルミストが遮られる可能性が考えられる。このモデルをすべてダウンカットで加工を行い、ノズル 1 本でオイルミストを供給する場合、図 13 のとおりモデルの左側にノズルを設置することで、立壁にオイルミストが遮られることなく、概ね図 1 の 0°、180°、270° の 3 方向で加工が可能と考えられる。

また 3. 2 の結果から、ノズル距離を 50mm にすることで、従来手法である高圧クーラントよりも大幅に寿命を延ばすことが期待できる。

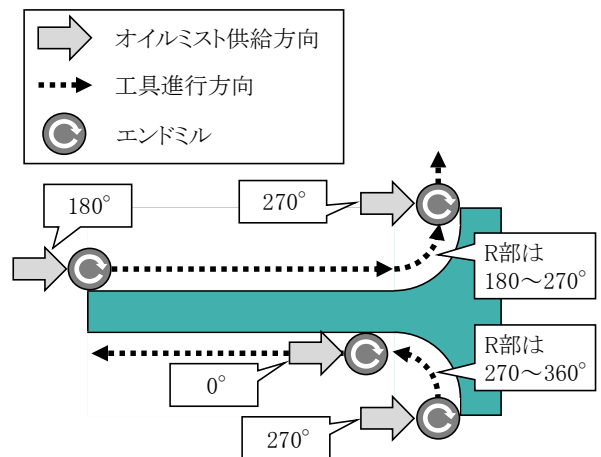


図 13 工具進行方向とノズル方向

3. 4 実証試験

加工機 1・2 を用い取得した切削距離に対する摩耗幅の推移を図 14 に示す。どちらの加工機においても MQL は摩耗の進行が緩やかであり、高圧クーラントに比べて摩耗幅が小さいことが伺える。

切削したモデルの個数と摩耗幅の関係に着目すると、高圧クーラントは加工機 1 では 3 個（切削長 60.6m）、加工機 2 では 1.5 個（30.3m）で摩耗幅が 50 μ m を超えているものの、MQL は加工機 1・2 ともに 8 個（切削長 161.6m）において摩耗幅は 40 μ m 以下に留まっている。

ここで、工具の摩耗幅が 50 μ m を超えた場合、摩耗が急激に進行することがわかる。これより、各条件の摩耗幅の直線部データから近似直線を作成し、近似直線が 50 μ m を超えた切削長を推定工具寿命とした。その結果、推定工具寿命は表 2 のとおりとなり、加工機の差異に関係なく高圧クーラントに比べ 10 倍以上の長寿命を実現した。

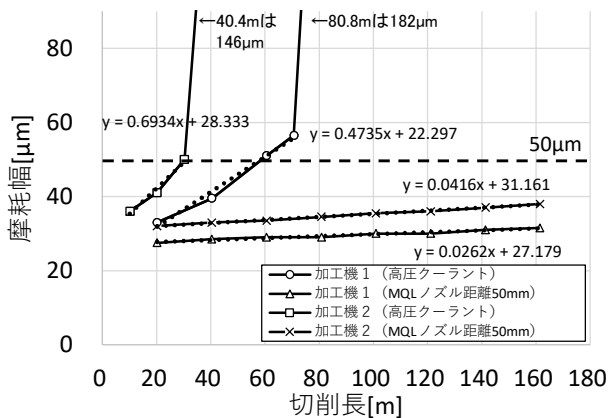


図 14 実証試験結果

表 2 推定工具寿命

	給油方法	推定工具寿命[m]
加工機1	高圧クーラント	58.5
	MQL ノズル距離50mm	871.0 (14.9倍)
加工機2	高圧クーラント	31.2
	MQL ノズル距離50mm	452.9 (14.5倍)

4 おわりに

本研究では、MQL を用いてチタン合金のエンドミル加工における工具の長寿命化を実現するため、エンドミルとノズルの距離や切削方向に対するノズルの方向が工具寿命に与える影響を調査し、航空機部品の実加工を想定した加工モデルに対してノズル設置条件を検討することで、以下の知見を得た。

- (1) 一定以上ノズル距離が長くなると、オイルミストの効果が損なわれ、急激に摩耗が進行する。
- (2) 刃先が被削材から離脱してからオイルミストが作用するまでの時間が長いノズル方向では、オイルミスト効果が低減する。
- (3) 航空機部品の実加工を想定した加工モデルに対して MQL の適用を行った結果、加工機の差異に関係なく高圧クーラントに比べ 10 倍以上の長寿命を実現した。

参考文献

- 1) 藤原順介ほか：“日本機械学会論文集”，82 (835)，pp.15-00556，(2016)
- 2) 笹原弘之ほか：“精密工学会誌”，66 (1)，pp.80-84，(2000)