

重点共同研究（航空宇宙分野）

チタン合金のエンドミル加工における MQL 供給システムの開発

近藤 弘康* 棚原 貴登* 石原島 弘明*
小嶋 広光** 小松 弘樹** 関戸 誉道** 藤野 聡** 有住 真吾**

Development of Minimum Quantity Lubrication Supply System in End Milling of Titanium Alloys

KONDO Hiroyasu, TANAHARA Takato, ISHIHARAJIMA Hiroaki

KOJIMA Hiromitsu, KOMATSU Hiroki, SEKIDO Takamichi, FUJINO Satoshi and ARIZUMI Shingo

本研究では、チタン合金のエンドミル側面切削における工具の長寿命化のため、MQL のエア－圧力や流量、ノズル形状変更時のエア－打力を測定し、選定した条件で工具摩耗試験を行い、オイルミスト効果を評価することで、大型部品等に適用可能な MQL 供給システムの開発を行った。航空機部品を模擬した加工モデルに対して開発システムを用いた結果、ノズル距離 120mm、ノズル角度 45° の条件で中仕上げ加工条件・荒加工条件ともに摩耗の進行が抑制され、荒加工条件では従来用いられている高压クーラントに比べて 3 倍以上の工具寿命が得られた。

Key words: MQL, エンドミル加工, チタン合金, エア－打力, 供給システム

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、機体の軽量化等を目的とした 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チタン合金の切削加工を行う際、切りくず排出や冷却を目的として主に高压クーラントを用いた加工が行われているが、更なる工具寿命の長寿命化のため、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) 加工が注目されている。

令和 3 年度の研究において、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明らかにし、航空機部品を模擬したモデルに MQL を適用したところ、加工機の差異に関係なく、従来用いられている高压クーラントに比べて 10 倍以上の工具寿命が得られた¹⁾。

一方、このときのオイルミストの効果が得られるノズ

ル距離は 50mm であったため、適用できる対象が限られており、ノズルの干渉が懸念される大型部品・立壁加工部品等に適用対象を広げるため、オイルミスト効果が得られるノズル距離の延長が求められている。

そこで本研究では、MQL のエア－圧力や流量、ノズル形状変更時のエア－打力の測定結果から条件を選定し、選定した条件で工具摩耗試験を行い、オイルミスト効果を評価することで、チタン合金のエンドミル側面切削における大型部品等に適用可能な MQL 供給システムの開発を目指す。

2 研究の方法

2. 1 エア－圧力・流量変更時のエア－打力評価

様々なオイルミストブロー条件（エア－圧力・流量・ノズル形状等）を評価する場合、工具摩耗試験でオイルミストの効果の有無を確認するには、多くの工具・被削材及び実験時間を要するため、代替手段で効果を確認できることが望ましい。

令和 3 年度の研究結果から、刃先に発生する凝着物の除去の有無によってオイルミストの効果が決定されている可能性が高い¹⁾ため、エア－打力（吹き飛ばし力）を定量化する手法を検討し、オイルミスト効果の評価を試みた。

エア－打力の測定については、はかりを用いたエアブロー力の評価を行った手法²⁾を参考とし、一定面積にお

* 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

ける打力を評価可能にするため、φ6mm 超硬軸を精密はかり（エー・アンド・デイ製 EJ-1500）に立て、φ6.3mm の穴を空けた防風カバーを設置することで、超硬軸の先端をカバーの外に出し、φ6mm の面に当たるエアの打力のみ測定可能な装置を製作し、評価に用いた（図1）。

試験方法は、5 軸マシニングセンタ（DMG 森精機 DMF180）の主軸にオイルミストノズルを取り付け、下向きにエアブローが吐出されるよう段取りを行い（図2）、表1のとおりエア入力圧・流量を設定し、ノズル距離を10mm から150mm まで10mm 刻みで変更し、エアブローを吐出した際の精密はかりの表示荷重を記録した。

なお、オイルミスト装置はフジBC技研製Bluebe Model FK を用い、ノズルは当装置付属の標準ノズル（LOC-LINE® 1/4inch システム 1/8inch ラウンドノズル）を用いた。



図1 エア打力評価装置

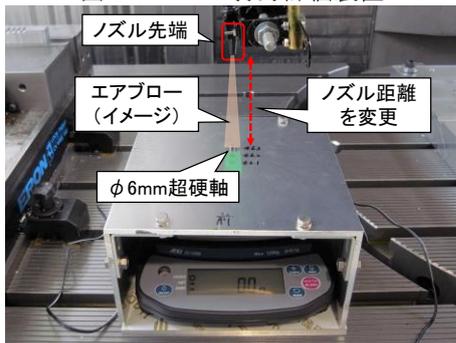


図2 エア打力評価試験段取り

表1 エア入力圧・流量条件

条件	入力圧	流量
①	0.6MPa	100L/min
②	0.7MPa※1	100L/min
③	0.6MPa	145L/min※2
④	0.7MPa※1	145L/min※2

※1 装置最大入力圧

※2 装置最大流量

2. 2 ノズル変更時のエア打力評価

2. 1におけるエア入力圧・流量の比較によって、装置付属の標準ノズルを用いてオイルミスト効果を延長できる可能性が得られた。そこで、更に有効なノズル距離を伸ばすため、ノズル変更時のノズル距離とエア打力の関係性を評価した。

標準ノズルの口径は1/8inch (=3.175mm) であるため、吐出エアを絞ることを目的とし、評価ノズルは口径が3mm 以下のいけうち製の直進エアノズル4種（表2、図3）を用い、2. 1と同様の段取りでノズル距離を10mm から150mm まで10mm 刻みで変更した際の精密はかりの表示荷重を記録した。

なお、エア入力圧は0.7MPa、エア流量は装置最大流量とした。

表2 評価ノズル一覧

	型番	口径
①	1/8M CCP φ 1.0A S303	φ 1.0mm
②	1/8M CCP φ 1.5A S303	φ 1.5mm
③	1/8M CCP φ 2.0A S303	φ 2.0mm
④	1/8M CCP φ 2.5A S303	φ 2.5mm

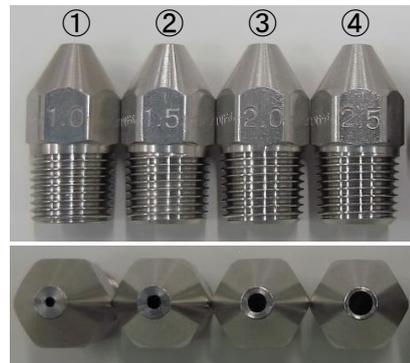


図3 評価ノズル外観
（上：側面，下：正面）

2. 3 選定ノズルを用いた摩耗試験

2. 2で選定したノズルを用いて、オイルミスト効果が得られるか確認を行うため、表3の工具・切削条件で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た。試験段取りを図4に示す。

なお、ノズル距離は120mm とし、ノズル方向は図5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（0°）に固定し、ノズル角度は図6のとおり30° と45° の2つの角度で試験を行った。摩耗幅はマシニングセンタ内に固定したカメラを用いて各切削距離の刃先の定点観察像から測定した。切削力は切削抵抗測定装置（日本キスラー 9257B）を用いて測定し主分力のピーク平均を使用した。

表3 工具・切削条件

工具	直径	10mm
	形状	ラジアスエンドミル
	コーティング	TiAlN
	母材	超硬
	刃数	2枚刃
切削条件	切削速度	100m/min
	1刃送り	0.1mm/tooth
	軸方向切込み	3.0mm
	半径方向切込み	1.0mm

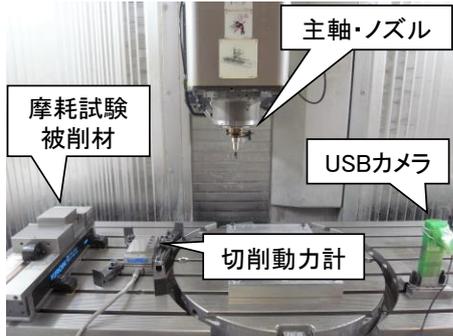


図4 摩耗試験段取り

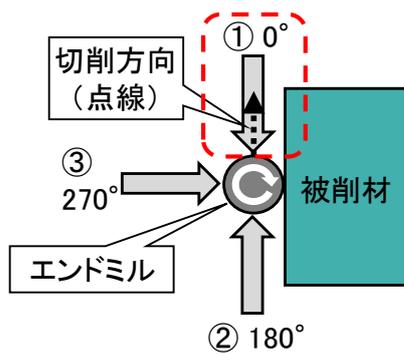


図5 ノズル方向

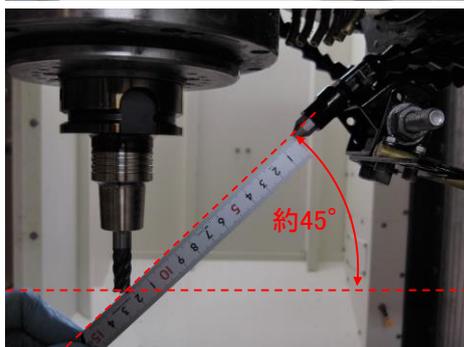
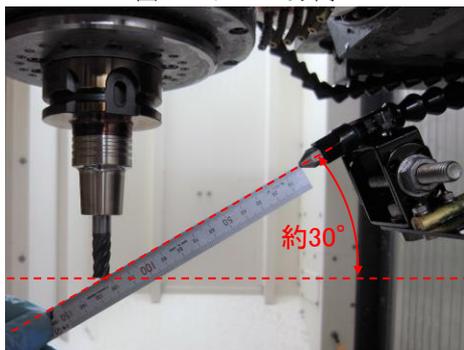


図6 ノズル角度 (上: 30°, 下: 45°)

2. 4 MQL 供給システムの開発

2. 1～2. 3の結果からオイルミストブロー条件を選定するとともに、MQL使用時の段取りを容易にするため、使用工具に応じたノズル位置の調整が可能な機構を考案し、MQL供給システムの開発を行った。

2. 5 実証試験

開発したMQL供給システムの実証のため、側面切削の中仕上げ加工条件及び荒加工条件で航空機部品を模擬した加工モデルを複数個切削し、MQLと高圧クーラントにおける工具摩耗状態の比較を行った。

2. 5. 1 中仕上げ加工実証試験

5軸マシニングセンタ (DMG 森精機 DMF180) を用いて、図7の加工モデルを複数個切削し、摩耗幅と切削力の測定を行う実証試験を行った。

加工パスについては、図8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す加工パスを用いた。なお、切削長については、加工モデル1個につき20.2mmの長さとなる。また、被削材は64チタン圧延材 (AMS4911)、工具・切削条件は表3のとおりとし、ノズル距離は120mm、ノズル角度は45°、ノズル方向は270°とした。ここで、摩耗幅と切削力の測定については2. 3と同様の手法を用いた。

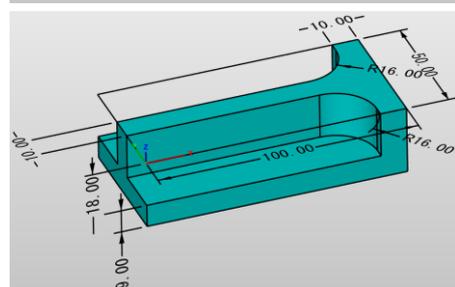
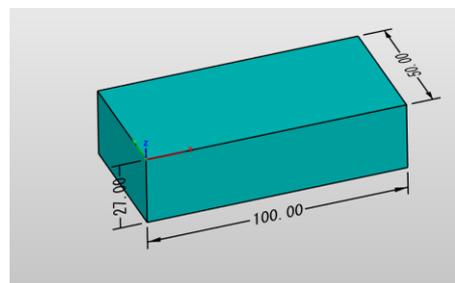


図7 中仕上げ加工実証試験の加工モデル (上: 被削材, 下: 加工モデル)

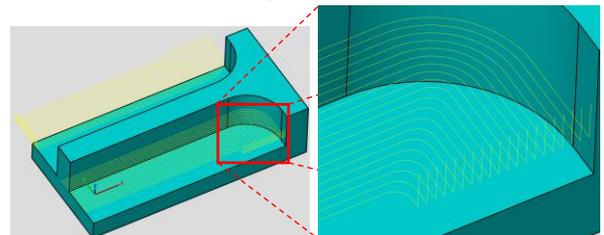


図8 加工パス (輪郭加工20回オフセット, 1段目のみ表示)

2. 5. 2 荒加工実証試験

5軸マシニングセンタ（牧野フライス a61nx）を用いて、航空機部品を模擬した加工モデルを複数個切削し、チップ摩耗状態の評価を行う実証試験を行った。

なお、工具はチップ交換式ラジアスエンドミルを用い、切削条件は荒加工条件とし、チップ摩耗状態はデジタル顕微鏡（ハイロックス KH-8700）を用いて観察を行った。

3 結果及び考察

3. 1 エアー圧力・流量変更時のエアー打力評価

エアー入力圧・流量変更時のエアー打力評価結果を図9に示す。各条件ともにノズル距離が遠くなるにつれてエアー打力が小さくなり、入力圧・流量を大きくすると、どちらもエアー打力は増加することが分かる。

過去の研究¹⁾において、条件①のエアー入力圧・流量条件にて、ノズル距離 50mm までオイルミスト効果が有効であることを確かめられたため、条件①のノズル距離 50mm におけるエアー打力 8g を基準とする場合、条件④ではノズル距離 100mm においてオイルミスト効果が得られると期待される。

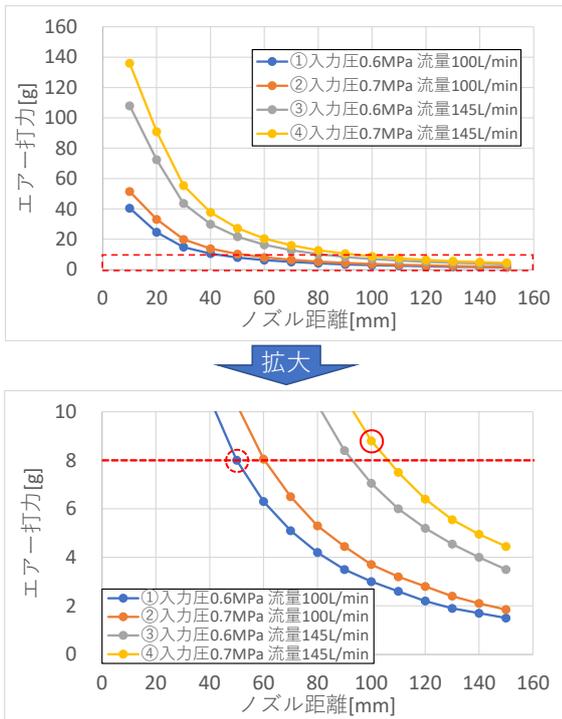


図9 ノズル距離とエアー打力の関係
(エアー入力圧・流量変更)

3. 2 ノズル変更時のエアー打力評価

ノズル変更時及び標準ノズルのエアー打力評価結果を図10に示し、各条件のエアー出口圧、エアー流量の測定結果を表4に示す。ノズル口径φ2.0mm、φ2.5mmは標準ノズルよりも強いエアー打力を示し、エアー打力 8g

を基準とする場合、ノズル距離 120mm においてどちらもオイルミスト効果が得られると期待される。

一方、ノズル口径φ1.5mmは標準ノズルと同程度のエアー打力を示し、ノズル口径φ1.0mmは標準ノズルよりも弱いエアー打力を示した。これはノズル口径を絞ることでエアー出口圧は大きく出来るものの、ノズルの出口面積が小さくなるため、エアー流量が低下し、結果としてエアー打力が弱まったものと考えられる。

また、ノズル口径φ2.0mmとφ2.5mmについて比較すると、φ2.0mmはφ2.5mmに比べ、エアー流量が小さいため、エアーを供給するコンプレッサーの負荷を考慮すると、エネルギーコストの面からφ2.0mmの方が望ましいと言える。

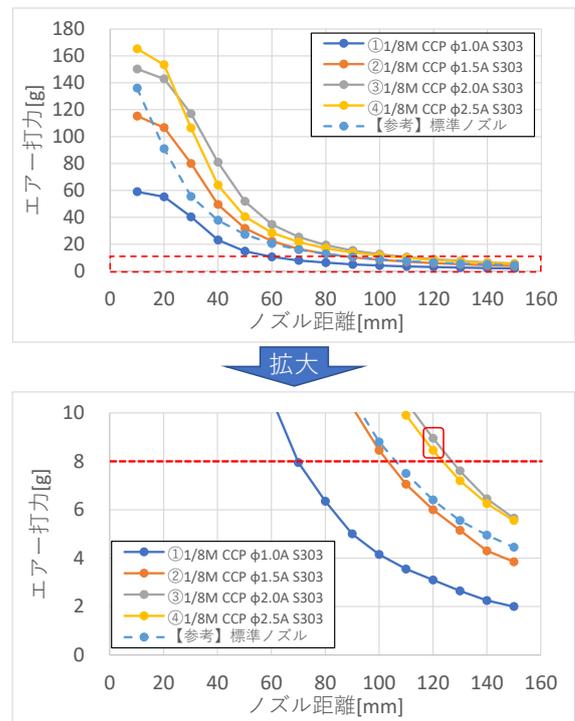


図10 ノズル距離とエアー打力の関係
(ノズル変更)

表4 ノズル変更時のエアー出口圧・エアー流量

条件	エアー出口圧	エアー流量
①	0.62MPa	30L/min
②	0.50MPa	55L/min
③	0.36MPa	85L/min
④	0.25MPa	120L/min

3. 3 選定ノズルを用いた摩耗試験

3. 2で選定したノズル「1/8M CCP φ2.0A S303」及び高圧クーラント、標準ノズル（ノズル距離 50mm、ノズル角度 30°）を用いた結果を図11に示す。

ノズル角度 30°、45°ともに切削長 10m以降、摩耗の進行が抑制され、高圧クーラントに比べて長寿命の結果

が得られた。なお、標準ノズルの結果と比較したところ、摩耗幅・切削力ともに同様の推移を示すため、選定ノズルを用いた本試験の条件はオイルミスト効果を有すると言える。また、3. 1、3. 2で用いたエア打力を指標とした評価方法はオイルミスト効果の有無の評価に活用可能と考えられる。

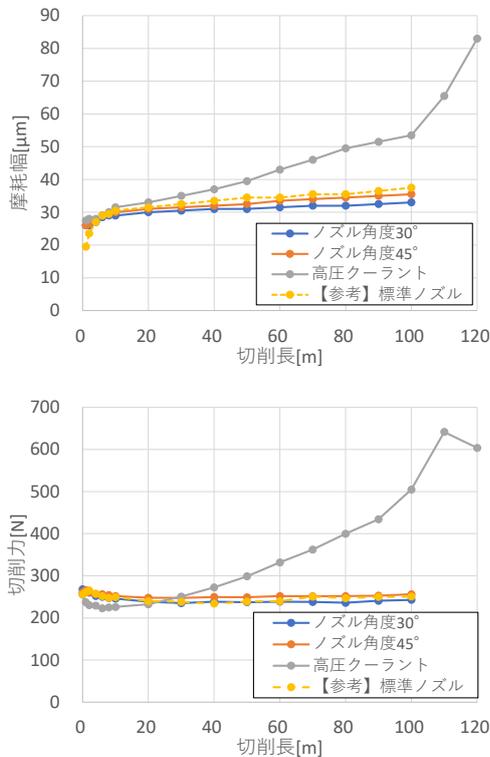


図 1 1 摩耗試験結果 (上：摩耗幅，下：切削力)

3. 4 MQL 供給システムの開発

3. 1～3. 3の結果を基に、エア入力圧「0.7MPa」、エア流量「85L/min」、ノズル「1/8M CCP φ2.0A S303」を採用し、開発したMQL供給システムを図12、13に示す。

当システムは主軸固定治具、ステージ固定治具、1軸ステージ、スライダ治具から構成され、スライダ治具にノズル「1/8M CCP φ2.0A S303」を固定することで、図13のとおりノズル距離120mm、ノズル角度45°でMQLを供給することが可能である。

なお、1軸ステージを用いてノズル位置を工具軸方向に調整可能であり、ステージ固定治具と1軸ステージの間にスペーサーを入れることでノズル位置を工具半径方向に調整可能であるため、様々な工具に対応できる。

加えて、サブノズル治具を設置することで、2本のノズルで深い軸方向切込みにも対応可能である(図13)。

また、加工機の主軸の構造に応じて、主軸固定治具とステージ固定治具を製作することで、他の加工機にも設置が可能である。

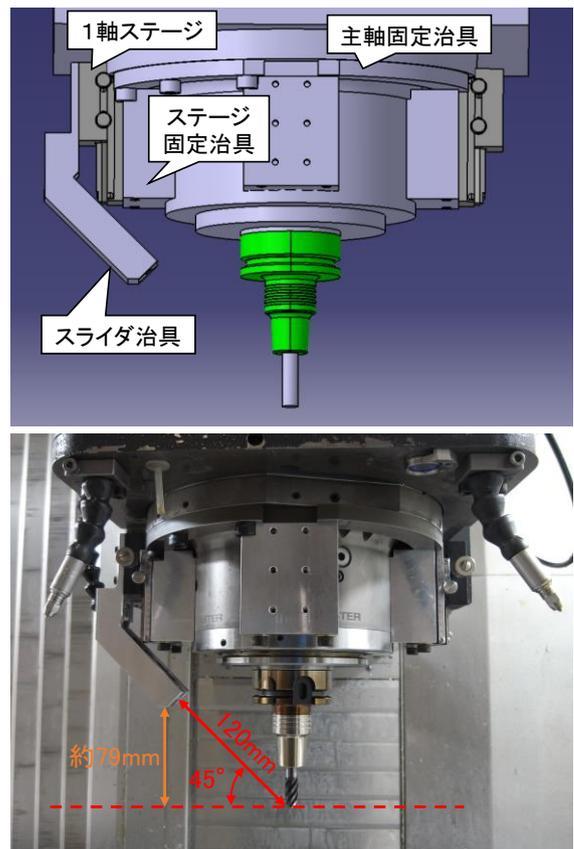


図 1 2 MQL 供給システム
【DMG 森精機 DMF180 用】
(上：3DCAD モデル，下：装置取付時外観)

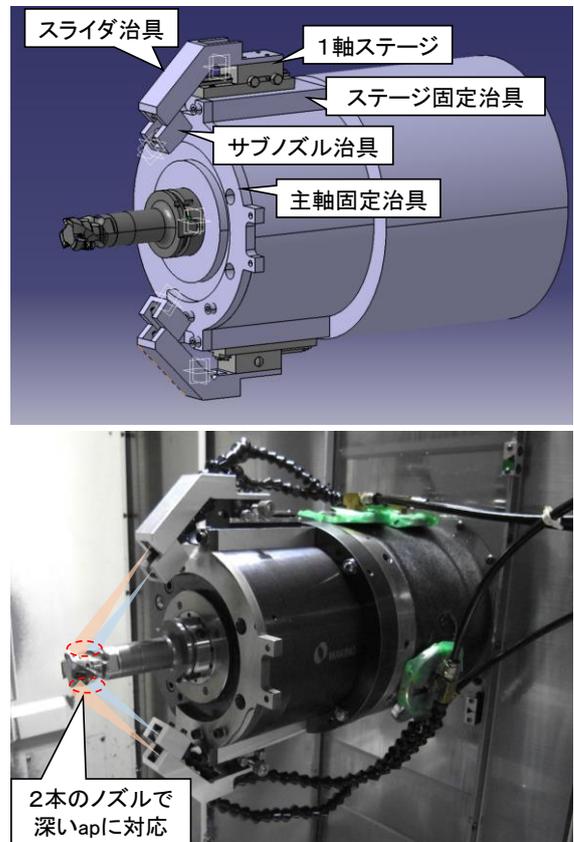


図 1 3 MQL 供給システム
【牧野フライス a61nx 用】
(上：3DCAD モデル，下：装置取付時外観)

3.5 実証試験

3.5.1 中仕上げ加工実証試験

開発システム及び高圧クーラント、標準ノズル（ノズル距離 50mm, ノズル角度 30°）を用いた結果を図 1 4 に示す。

摩耗幅に着目すると、開発システムは摩耗の進行が抑制され、高圧クーラントに比べて長寿命の結果が得られた。標準ノズルの結果と比較したところ、初期摩耗の違いから、開発システムはやや大きい値を示しているが、摩耗の進行は同様の推移を示すことが伺える。

また、切削力についても同様の推移を示すことから、開発システムは図 7 の加工モデルにおいてもオイルミスト効果を有すると言える。

開発システムを用いることで、工具先端からノズル治具まで約 79mm のクリアランスが得られる（図 1 3）ことから、厚み 79mm 以下の大型部品等への MQL の適用が期待できる。

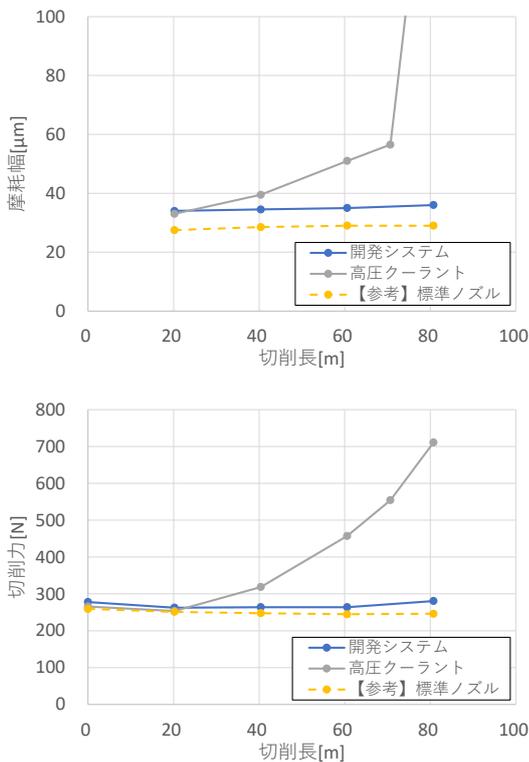


図 1 4 中仕上げ加工実証試験結果
(上：摩耗幅，下：切削力)

3.5.2 荒加工実証試験

開発システム及び高圧クーラントを用いた試験におけるチップの観察結果を図 1 5 に示す。

高圧クーラントを用いた場合、被削材 1 個目加工後にチップに欠けが発生し、2 個目の途中で加工機のロードメータの値がリミット値に近づいたため、試験を中止した。一方、開発システムを用いた場合、被削材 3 個加工後もチップに大きな欠けは見られなかった。

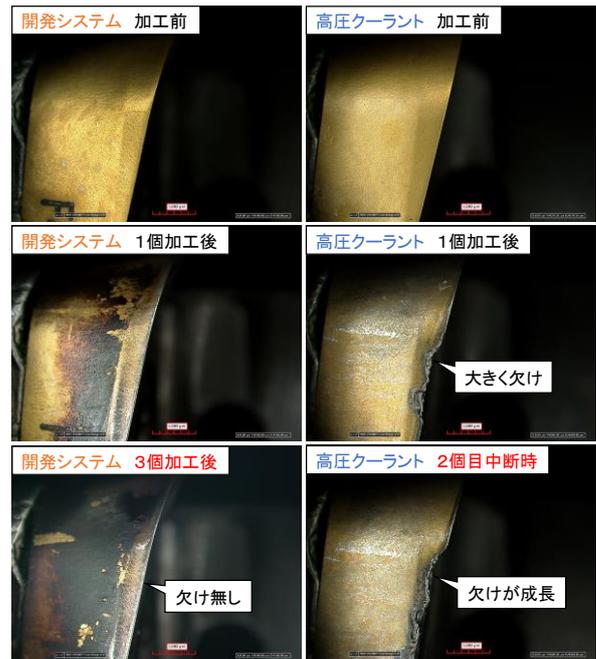


図 1 5 荒加工実証試験におけるチップ観察結果

そのため、荒加工条件においても、開発システムはオイルミスト効果を有し、従来用いられている高圧クーラントに比べて、3 倍以上の工具寿命が得られた。

4 おわりに

本研究では、MQL のエア圧力や流量、ノズル形状変更時のエア打力の測定結果から条件を選定し、選定した条件で工具摩耗試験を行い、オイルミスト効果を評価することで、チタン合金のエンドミル側面切削における大型部品等に適用可能な MQL 供給システムの開発を行い、以下の知見を得た。

- (1) エア打力評価方法を考案し、エア圧力や流量、ノズル形状を変更した際のエア打力を評価した結果、ノズル距離 120mm でオイルミスト効果を有する条件が得られた。
- (2) 得られたオイルミストブロー条件を採用するとともに、使用工具に応じたノズル位置の調整が可能な機構を考案することで、MQL 供給システムの開発を行った。
- (3) 中仕上げ加工条件の切削試験を行い、開発システムはノズル距離 120mm, ノズル角度 45° でオイルミスト効果を有することを実証した。
- (4) 荒加工条件の切削試験を行い、従来用いられている高圧クーラントに比べて、開発システムは 3 倍以上の工具寿命が得られた。

謝 辞

本事業で用いた測定機の一部は公益財団法人 JKA の補助事業によるものであり、競輪マークを記して謝意を表

する。

参考文献

- 1) 近藤 弘康ほか: “栃木県産業技術センター研究報告”, 19, 1-5, (2022)
- 2) 寶山 靖浩ほか: “品質工学”, 17(3), 65-72, (2009)



本研究は、公益財団法人 JKA 補助事業により整備した機器を活用して実施しました。