

月刊

THE TRIBOLOGY

トライボロジー

2026

No.463

3

MOTION & CONTROL™

NSK



特集

切削・研削・塑性加工技術

人間のように力加減を自動調節しながら把持する「アダプティブAIグリップ」

日本精工

難削材の高能率エンドミル加工を目指す 超高压クーラント技術の活用



森合 勇介*

Yusuke MORIGO

(株)トクビ製作所 部長

毛 経天

Keiten MOU

東京大学 生産技術研究所 機械・生体系部門 土屋研究室 特任研究員

1. 航空機エンジン難削材の高速ミーリング

航空機エンジンにおいては、チタン合金 (Ti-6Al-4V) やニッケル基超合金 (Inconel718) といった難削材が広く使用されている (図1)。これらは優れた高温強度や耐食性を備え、極めて苛酷な環境下でも信頼性を発揮するため、タービンブレードやディスクなど重要部品に不可欠な材料である。しかし一方で、熱伝導率が低く、切削抵抗が大きく、加工中に顕著な加工硬化が進行するため、切削時には刃先に大きな熱・機械的負荷が集中する。表1には代表的難削材の物性値がまとめられている。表1のとおり64チタンとインコネル718の硬度と強度が高く、熱が逃げにくいことが分かる。その結果、局所的には1300℃近い高温に達し、工具摩耗や欠損が急速に進行する。

特に断続切削であるミーリング加工では、衝撃的な負荷と高温が繰り返し作用するため、工具寿命の低下は旋削以上に深刻

となる。従来は切削速度を大きく制限し、Ti-6Al-4Vでは約60m/min、Inconel718では約30m/minといった低速条件での加工が主流であった。確かに速度を抑えることで工具寿命をある程度確保はできるが、その代償として加工時間が長大化し、生産性向上の妨げとなってきた。

近年、航空機産業における需要増大やコスト削減の要請を背景に、高速ミーリングの導入が進められている。50m/minを超える切削速度は高能率加工とされ、効率や仕上げ面粗さの改善に有効であることが報告されている。しかしながら、高速化に伴い工具摩耗は加速し、構成刃先や凝着層の形成が顕著となることで、加工安定性が著しく損なわれる。これを克服するため、加工現場では従来から外部給油 (Flood coolant) が用いられてきたが、大量のクーラントを使用しても刃先近傍まで十分に届かず、流速を失った液体は熱交換効果を発揮できない。一般的なマシニングセンターでは主軸近傍に複数の角度調整式ノズルを備えているが、給油位置や流路の制約により刃先冷却は不十分である。このため、難削材の高速ミーリングを実現するには、従来方式とは異なる革新的な冷却技術が不可欠

である。

2. 超高压クーラントとは

難削材加工における課題を解決する手段として注目されているのが、超高压クーラント (HPC: High Pressure Coolant) 技術である。超高压クーラントは多くの研究者に難削材加工効率向上の最も効率的な解決手段と認められている。図2は工具の加工断面図となる。塑性変形がメインである主せん断領域に、30~60%の切削熱が発生し、すくい面と切りくずの接触面である2次せん断領域に10~30%の加工熱が生じると言われている。切削点にクーラント液を高圧で給油することで、切削温度を下げ、切りくずの排出性を改善し、加工表面の品質を高める効果がある。特にニッケル基合金の加工ではその有効性が高い。

すくい面給油は切削温度の低減や切りくず分断に効果的であり、これまで旋削加工を中心に多くの成果が報告されている。

本稿ではInconel718の高速ミーリングにおける超高压クーラントの活用実例を紹介する。

旋削加工の分野では、すでに逃げ面給

*【著者問合せ先】

〒581-0854 大阪府八尾市大竹3-167
Tel.072-941-2288 Fax.072-941-5181
E-mail y.morigo@tokupico.jp

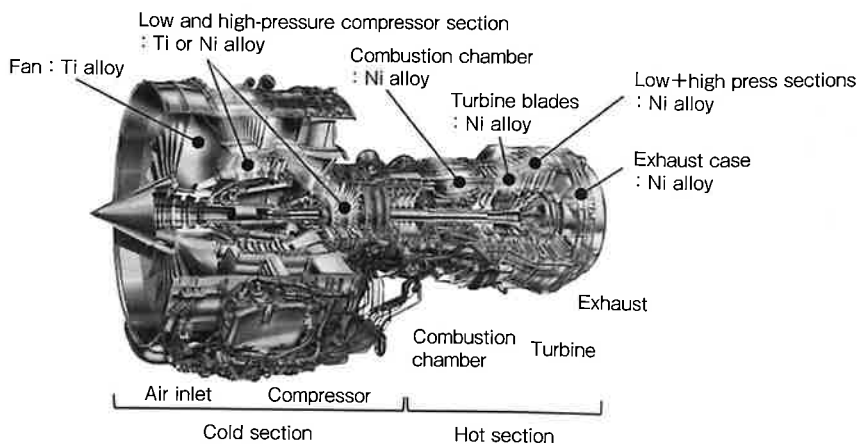


図1 航空機エンジンに使用される難削材¹⁾

表1 代表的難削材の被削性²⁾

材種	硬度 (HV)	引っ張り強度 (MPa)	伸び率 (%)	($k\rho C$) ^{0.5}
B1112	110	400	20	0.00215
S45C	200	600	20	0.00215
AISI4340	230	750	20	0.00215
SUS 304	150	630	40	0.00419
Ti-6Al-4V	300	1000	12	0.00789
Alloy 718	450	1400	21	0.00505
13Mn-1C	400	950	50	0.00461

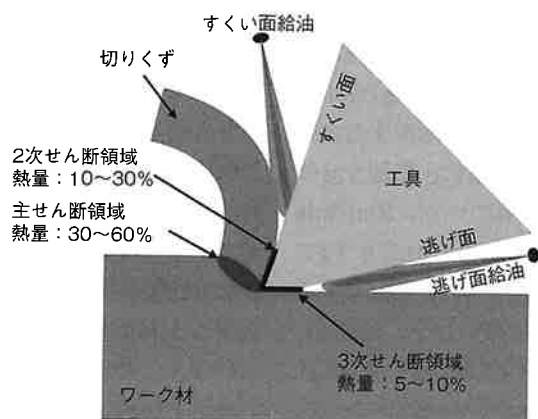


図2 加工断面図

を可能とし、環境への配慮ができる手段は高圧クーラントであると考えられる。

今回の実験では、この考え方にに基づき、内部流路を備えたオリジナルエンドミルを設計し、刃先近傍から超高压クーラントを直接吐出させる実験を行った。工具摩耗の進行を詳細に観察することで、その有効性を検証することを目的とした。

3. クーラントの吐出 (工具設計)

本研究では、当社と東京大学の共同研究体制のもと、刃先近傍からクーラントを直接吐出するオリジナルエンドミルを設計した。工具は東新製作所により3Dプリンターで造形され、その後ダイジェット工業で仕上げ加工が施された。

市販の工具の多くは、すくい面側の刃物先端 (tool nose) に向けて1本のノズルを備えている。例えば、市販のスローウェイトタイプのエンドミル (切削直径 Φ 16mm) では、内径2mmのノズルが刃物先端に向けて設置されている (図3)。これでは圧力を上げるために大量のクーラントが必要となり、使用効率が低下する。本実験に使用する工具 (図4) はスローウェイトタイプのエンドミルをベースに設計したものであり、以下の設計理念に基づいている。まず、動バランスを確保するために2枚刃の対称形とした。マシニングセンターのスピンドルから給油されたクーラントはホルダー内部を通り、長い流路を経て交換式インサート近傍のノズルから吐出される構造で、冷却効果を最大化するためノズル径を0.4~0.5mmに設定した。切削直径は15mmであるが、逃げ面ノズルのスペースを確保するためにホルダー外径は16mmとした。

図4(c)に示すように、各刃にはすくい面用と逃げ面用の2本の流路が設けられている。最小限の流量で十分な効果を得るための仕様であり、3Dプリンターの造形限界 (最小穴径0.4mm) に基づいて決定された。さらに、流路形状は急激な断面変化を避け、圧力損失を最小化するようにスムーズに設計された。

すくい面は主せん断領域と2次せん断領域における熱発生量の大部分 (約9割)

油工具の導入により工具寿命が大幅に延長された実績が報告されており、その有効性が確認されている。さらに、CFD (数値流体力学) 解析によっても、逃げ面からの給油が刃先周囲の流速や乱流を高め、冷却効果を増大させることが裏付けられている。また、逃げ面に働くクーラントの潤滑性が摩擦を低減でき、仕上げ面精度の向上に期待できる。

しかし、これまでの大流量の外部給油

という方法では主軸近傍に備えられた複数のノズルから、「ジャバジャバ」とクーラントを遠い距離から刃先に噴射されている。この大流量の噴射方法では、ノズル出口の流速が低く、特に刃先までのクーラントの流速がほとんどなくなってしまう。

流速の低いクーラント液は熱交換効果 (流速の関数) が発揮できない。またクーラントの吐出流量を削減し、高能率加工



図3 市販エンドミル

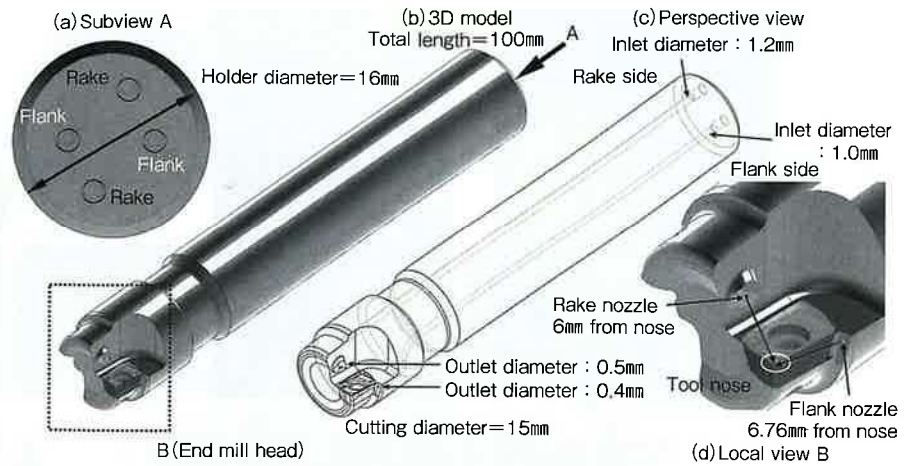


図4 オリジナル工具の外外形図³⁾

表2 Inconel718切削条件

パラメーター	評価
ワーク材	Inconel718
切削直径	15mm
切れ刃枚数	1
切削速度(周速)	120m/min
送り量	0.1mm/tooth
軸方向切込み	3mm
径方向切込み	0.5mm
切削方向	ダウンカット
給油方式	乾式、湿式
クーラント成分	ソリュブル
高圧クーラント給油方式	逃げ面給油
クーラント圧力	外部給油(1MPa)、 高圧クーラント(3MPa、7MPa、14MPa、20MPa)

を担うため、逃げ面ノズルよりやや大きな内径とした。また、2本のノズルはいずれも刃物先端 (Tool nose) を狙うよう配置し、最も摩耗の厳しい箇所を重点的に冷却できるようにした。すくい面用と逃げ面用の流路は独立しており、入口部にはねじ穴を設け、シーリングテープを巻いたイモねじを挿入することで、両者を切り替えて使用できる仕組みとした。

さらに、ノズルから刃先までの距離を短く設計することで、高圧クーラントの勢いを維持できるようにした。出口からの距離が長いと流速が低下し、冷却効果が減少するためである。本設計では、すくい面ノズルから刃先までの距離を6.00mm、逃げ面ノズルからは6.76mmとし、可能なかぎり短縮した。

4. 実際の切削における工具摩耗の様態

業界では、難削材の切削において超硬 WC-Co工具が広く使用されている。超硬合金 WC-Co工具は、高い耐熱硬度、耐摩耗性、そして靱性を兼ね備えており、難削材の加工に最も有効な選択肢であると広く認められている。Inconel718の高速ミーリングにおいては、工具摩耗の特徴が顕著に観察された。切削条件を表2にまとめる。注目すべきパラメーターは切削速度120m/minであり、これは業界で一般的に採用されている30m/minの4倍に相当する。

今回の実験では、乾式加工と湿式加工を比較した。湿式加工には外部給油と高

圧クーラントのパターンが含まれる。高圧クーラントについては、4種類の圧力条件を設定し、さらにすくい面および逃げ面からの吐出をそれぞれ組み合わせたため、合計8種類の条件となった。外部給油は、前述のように3本の太いノズルから総計約21L/minを吐出する(図5(a))。一方、高圧クーラントの流量は、すくい面給油の場合、3MPa:0.75L/min、7MPa:1.0L/min、14MPa:1.4L/min、20MPa:1.7L/minであり、逃げ面給油の場合は3MPa:0.46L/min、7MPa:0.6L/min、14MPa:0.8L/min、20MPa:0.9L/minであった。これらは外部給油流量の約2.2~8%に相当する。使用したクーラントは5%油含有のソリュブルである。高圧クーラントでの加工の

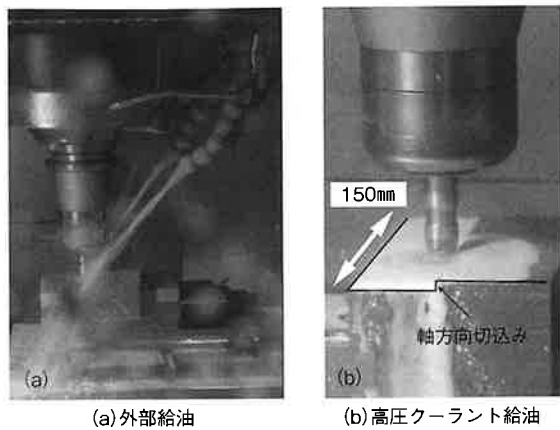


図5 加工のようす



図6 刃先外形図

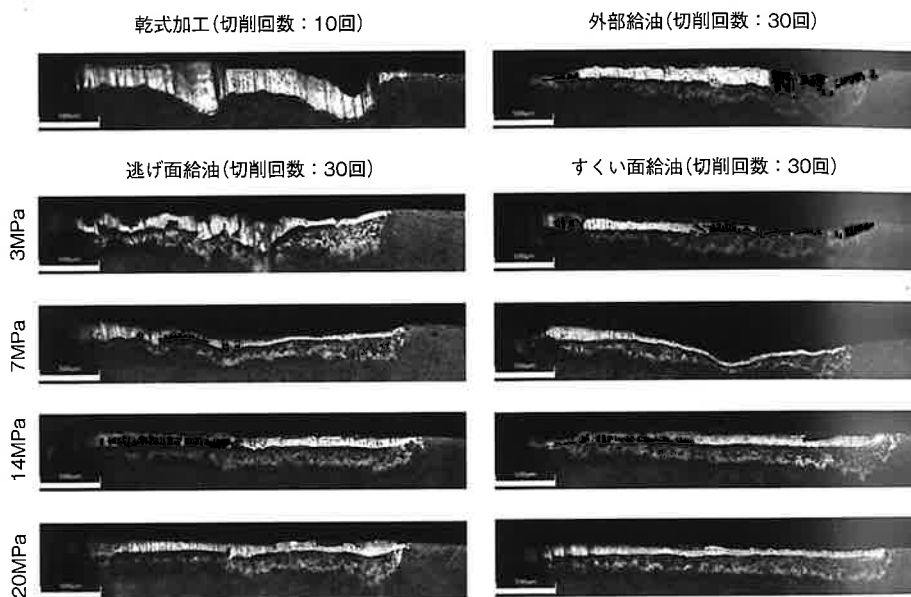


図7 主逃げ面摩耗

ようすを図5(b)に示す。比較対象は乾式加工、外部給油加工、高圧クーラント(3、7、14、20MPa)のすくい面給油および逃げ面給油である。

図6に工具刃先の外形図を示す。図中ではすくい面と逃げ面が確認できる。真上の面が切削エッジであり、その上部がすくい面、手前のほぼ垂直な面が逃げ面である。逃げ面は仕上げ面品質に直接影響するため、逃げ面摩耗は最も重要な評価パラメーターである。逃げ面は主逃げ面と副逃げ面に区分されるが、今回の肩削り用エンドミルでは軸方向切込みに沿った主逃げ面が顕著に摩耗していたのに対し、副逃げ面の摩耗はほとんど見られなかった。主逃げ面の摩耗写真を図7に示し、すくい面の状態を図8に示した。

乾式加工では、わずか10回のワークの加工で深刻な摩耗が発生し、工具表面には大きな欠けが確認された。このことから、高速ミーリングにおける乾式加工の困難さが明らかである。外部給油および3MPa、7MPaの高圧クーラントでは摩耗状態が類似しており、局所的に欠けが観察された。一方、14MPaおよび20MPaの超高圧クーラント条件では、主逃げ面摩耗幅が著しく狭くなった。すなわち、圧力の上昇に伴い逃げ面摩耗幅を低減できた。図8のすくい面では、20MPaを除き広範囲の脆性断裂痕が確認され、その位置は図7に示した欠けと一致していた。

これらの観察結果から、摩耗の主形態は脆性断裂(機械的破壊)であると考えられる。図9ではInconel718の降伏強度

と温度の関係を示す。温度上昇によってInconel718の強度が急激に低下するわけではない。また、本実験において加工硬化が確認された。未加工部の硬度は $327 \pm 15\text{HV}0.05$ であり、加工面下 $50\mu\text{m}$ では $360 \sim 440\text{HV}0.05$ に達した(図10)。加工硬化と高速ミーリングに伴う高周速により、工具は切込みのたびに大きな機械的衝撃を受ける。一方で、逃げ面での熱的摩耗は機械的摩耗に比べて小さい。すなわち、主因は機械的摩耗である。加工中の温度上昇は超硬WC-Co工具中の結合材Coを弱めるため、強い機械衝撃と高温によるCoの分解・劣化が重なり、工具は熱的摩耗よりも先に脆性断裂が生じたと考えられる。

クーラント圧力を高めることで、出口

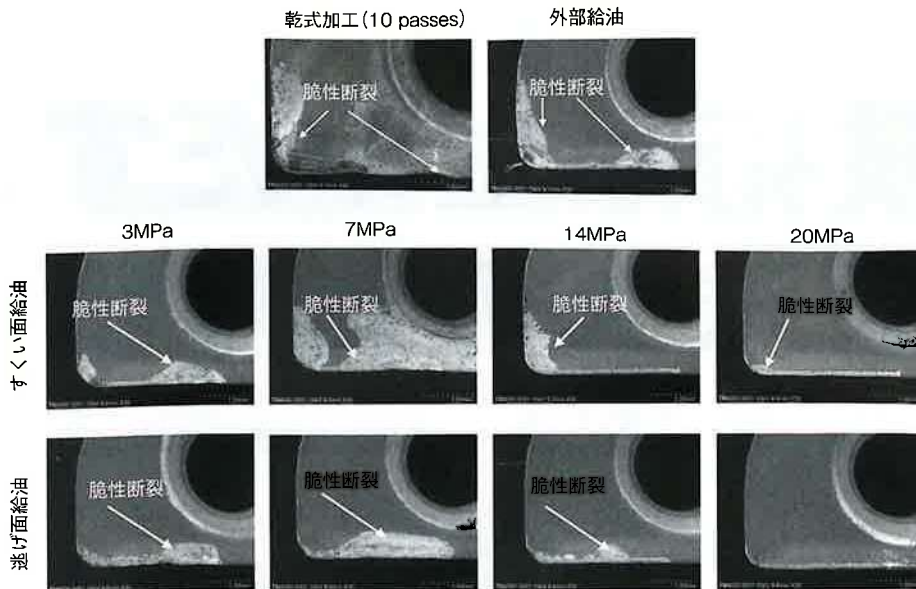


図8 すくい面摩耗

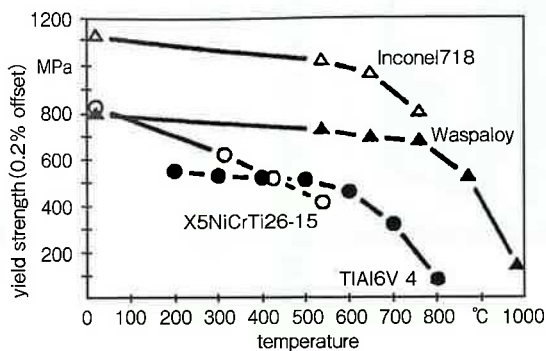


図9 航空合金の温度強度依存関係⁴⁾

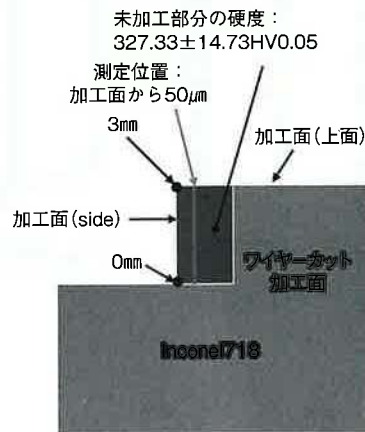


図10 ワーク断面図の硬度

流速および刃先に到達するクーラントの流速が増加し、刃先表面での熱交換効果が向上した。その結果、20MPaの超高压クーラントをすくい面・逃げ面いずれに給油した場合でも高い冷却効果が得られ、Coの劣化を抑制し、脆性断裂を最小限に抑えられることが分かった。これは超高压クーラント特有の利点である。

以上より、Inconel718の高速ミーリングは、高压クーラントの適用によって実現可能であると結論づけられる。

5. まとめ

本研究では、東新製作所およびダイジェット工業と共同開発した内部流路付き特注エンドミルを用い、当社の超高压クーラントユニット (HIPRECO) により最大20MPaの給油を行いながら、Inconel718の高速ミーリングを実施し

た。東京大学 生産技術研究所で分析した結果から見ると、外部給油と比較して大幅な流量削減を達成しつつ、工具寿命を飛躍的に向上できることを確認した。特に逃げ面給油を組み合わせた超高压クーラントは、局所的な熱集中を効果的に抑制し、摩耗低減に顕著な効果を示した。

6. 今後の展望

本研究で示した取組みは、従来困難とされてきた難削材の高速ミーリングに対し、超高压クーラントという新たな解決策を提示するものである。超高压クーラントは摩耗抑制、加工安定性向上、加工コスト削減、さらには環境負荷低減に資する可能性を有している。今後は、工具設計のさらなる最適化と組み合わせるこ

とで、より広範な加工条件における有効性を検証する予定である。超高压クーラントは、航空機産業をはじめとする次世代製造技術において、生産性と持続可能性を両立する中核技術となるであろう。

参考文献

- 1) Japanese Aero Engines Corporation.
- 2) Modern Tribology Handbook : CRC Press (2000)278.
- 3) Mao, J., Usuki, H., Tanaka, R., Morigo, C., & Yukinari, S. : Research on effect of ultra-high pressure coolant supplied from flank face in end milling of Ti-6Al-4V supported by CFD simulations. Journal of Manufacturing Processes, 118(2024) 15-31.
- 4) Klocke, F., König, W., & Gerschwiler, K. : Advanced machining of titanium-and nickel-based alloys(1996) pp.7-21. Springer Vienna.