

月刊 トライボロジー

THE TRIBOLOGY

2021

3

No.403

MOTION & CONTROL™

NSK



象限突起を低減するボールねじ技術

日本精工

特集

切削・研削加工技術

塑性加工技術

難削材加工における 高圧クーラント技術



杉原達哉
Tatsuya SUGIHARA

大阪大学 工学研究科 機械工学専攻

1. はじめに

近年、自動車・航空機分野などにおいては、車体・機体性能の飛躍的な向上を目的として、様々な先端材料の導入が進められている。例えば、航空機用ジェットエンジンでは、高温条件下において高強度かつ高耐食性を有するNi基超耐熱合金を用いることで、エンジンの高温化・高圧化・軽量化を実現しており、航空機用ジェットエンジンでは、重量比にして実に50%以上の割合でNi基超耐熱合金が用いられている¹⁾。その一方で、こういった材料を“加工”という観点から見た場合、それらの多くは加工が極めて困難な“難削材”であり、各種部品の高コスト・低生産性の原因となっている。

ここで、こういった難削材の高効率・高精度加工を実現するための技術として注目を集めているのが、高圧ポンプによって加圧した切削油剤を加工点近傍に設置したノズルから供給するという高圧クーラント供給技術である。高圧クーラ

【著者問合せ】
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1
Tel.06-6105-5219 Fax.06-6879-7287
E-mail t-sugihara@mech.eng.osaka-u.ac.jp

ント供給技術は、Pigottら²⁾が1952年にそのコンセプトを提案して以来発展を遂げ、現在では20MPa以上の圧力でクーラントを供給することが可能となっており、様々な材料の加工への適用が進められている。

本稿では、代表的な難削材であるNi基超耐熱合金について、高圧クーラントを援用した場合の加工事例を示すとともに、難削材加工における高圧クーラントの効果や、クーラントの高圧化によって顕在化する課題などについて解説する。

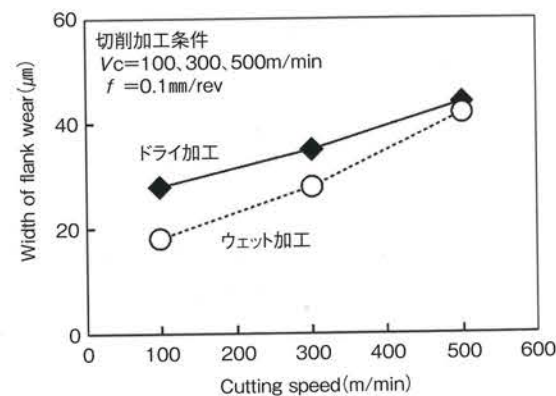


図1 切削速度と切削油剤の効果の関係

2. cBN工具を用いたInconel 718の高速切削加工

Ni基超耐熱合金の一つであるInconel 718は、高温条件下において高強度かつ高耐食性を持ち、クリープ強度も大きいことから、航空・宇宙産業分野ならびに原子力産業分野などで、近年需要が急増している。その一方で、加工硬化が生じやすい、工具材料との親和性が高い、熱伝導率が低いといった点から、加工が極めて困難な難削材として知られている³⁾。このInconel 718の切削加工に対して期待を集めているのが、cBN(立方晶窒化ほう素)の焼結体を用いたcBN工具である。

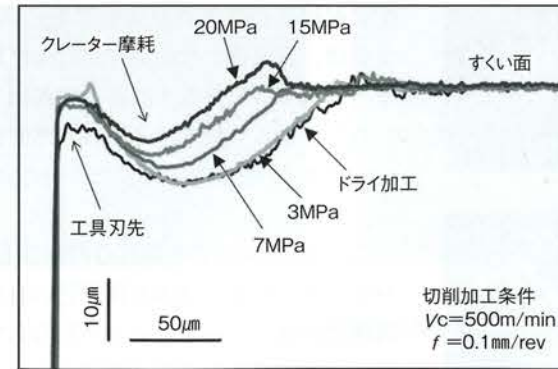


図2 クーラント圧力とクレーター摩耗量の関係

cBNはダイヤモンドに次ぐ高い硬度と熱伝導率を示し、鉄系材料との反応性が低いという特徴を持つことから、主に焼入れ鋼や鋳鉄といった鉄系金属の切削加工に広く用いられており、近年ではNi基超耐熱合金の切削加工にも展開が進められている^{4), 5)}。しかしながら、cBN工具の製造コストが超硬工具やセラミックス工具の5~10倍程度であることを考慮すると、現状のcBN工具の高速切削速度域における工具寿命は充分とは言えず、現場レベルの要求に満たされていないのが現状である⁶⁾。

ここで、図1に、cBN工具を用いてInconel 718を様々な切削速度で加工し、切削油剤を用いないドライ加工、水溶性切削油剤を用いたウェット加工、それぞれの工具摩耗量を比較した結果を示す。同図に示すように、切削速度100m/minにおいては、水溶性切削油剤の使用によって工具摩耗量が40%程度低減しているのに対し、切削速度の上昇とともにドライ加工とウェット加工における摩耗量の差は小さくなり、切削速度500m/minでは切削油剤供給による効果がほとんど得られていないことが分かる。これは、熱伝導率が極めて低いInconel 718の加工では、高速切削速度域の加工点温度が著しく上昇し、それに伴い切削油剤が膜沸騰状態になることによって、加工点への切削油剤の侵入が阻害されるためである⁷⁾。

このように、高速切削速度域において切削油剤の効果が得られないことが、Inconel 718の高速切削加工を困難にしている理由の一つとなっている。

3. Inconel 718の高速切削加工における高圧クーラントの効果

3-1 高圧クーラントの摩耗抑制効果

前述の高速切削速度域における切削油剤供給に関する問題に対しては、クーラントの高圧供給の効果が大きい期待できる。そして図2は、Inconel 718の高速切削加工(切削速度500m/min)に対して、高圧クーラントを供給した際における、cBN工具(cBN含有率:60~65%、バインダー材種:TiN基セラミックス)のすくい面に発生したクレーター摩耗の状態を示している。同図に示すように、クーラント圧力の上昇に伴ってクレーター摩耗量が著しく低減しており、クーラントの高圧化がInconel 718の高速切削加工においても有効であることが分かる。

さらに図3は、通常圧クーラント(3MPa、図3(a))と、高圧クーラント(20MPa、図3(b))を使用した場合につい

て、それぞれの条件下で排出された切り屑の状態を示しているが、加圧されたクーラントを加工点近傍に供給することによって、切り屑が細かく分断されて排出されていることが分かる。この結果は、特に展性・延性に富むInconel 718の加工では、連続的に繋がった切り屑の処理が自動化・無人化運転を実現する上でたびたび問題となるが、高圧クーラントの導入によって切り屑処理性の著しい向上も期待できることを示している。

3-2 クーラントの高圧化に伴う課題

前節で示したように、クーラントの高圧化は、難削材の高速切削加工において切削油剤の効果を著しく向上させ、工具摩耗の抑制や切り屑分断といった様々な効果をもたらす。その一方で、図4は、高圧クーラント条件下(20MPa)における、加工後の工具のすくい面、およびA-B部における断面のSEM観察像を示している。同図に示すように、すくい面上には

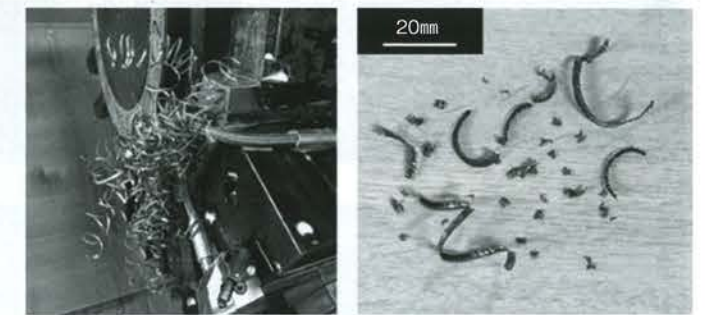


図3 高圧クーラントによる切り屑分断効果

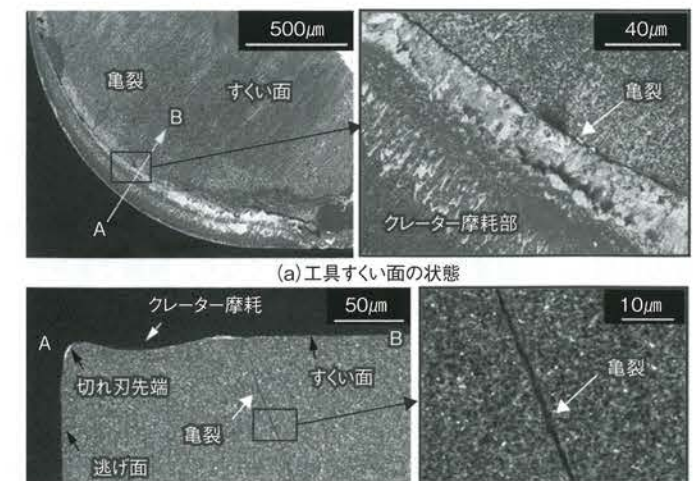


図4 高圧クーラント使用後の工具の状態

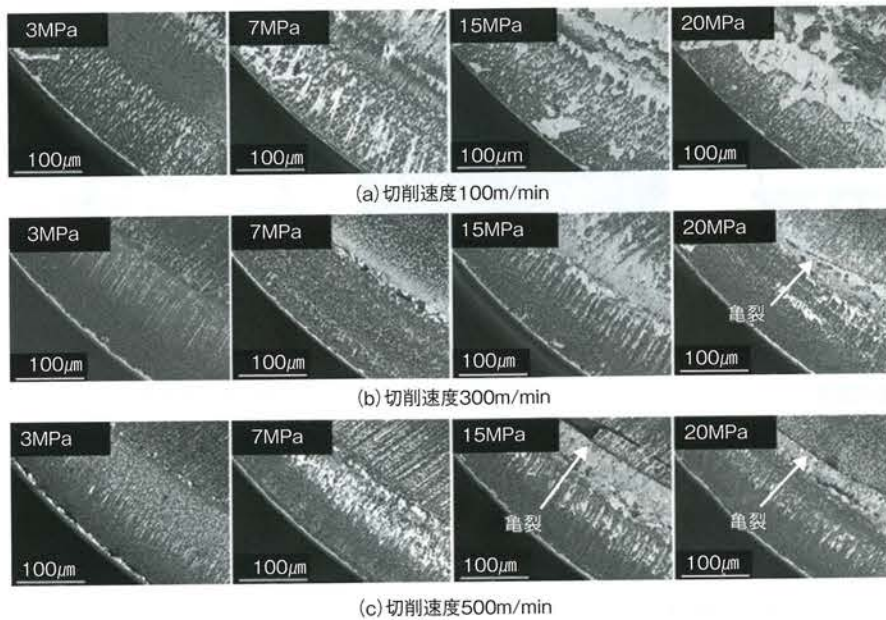


図5 各切削速度とクーラント圧力条件下における亀裂発生の有無

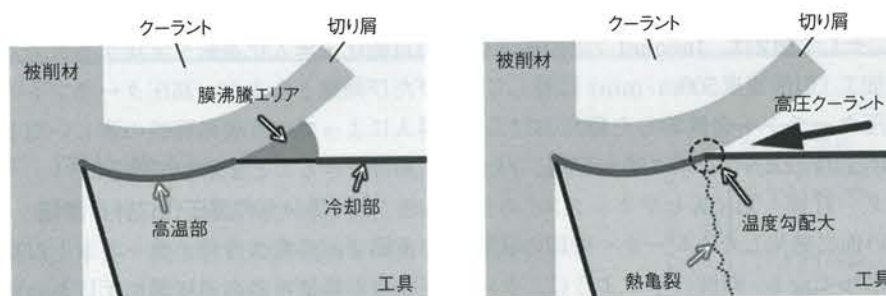


図6 亀裂の発生メカニズム

亀裂が発生しており、この亀裂は工具すくい面と摩耗発生部の境界部分から工具母材深くまで伝播していることが分かる。さらに、図5は様々な切削速度(100、300、500m/min)、クーラント圧力(3、7、15、20MPa)の組合せにおいて、亀裂発生の有無を整理した結果である。同図から分かるように、すくい面側の亀裂は、高速切削と高圧クーラントを組み合わせた条件下(切削速度300m/min×クーラント圧力20MPa、切削速度500m/min×クーラント圧力15MPa、切削速度500m/min×クーラント圧力20MPa)でのみ発生している。

以上の結果から、すくい面側に発生した亀裂は、工具内部での温度勾配を原因とする熱亀裂であることが予想される(図6)。まず、切削速度が高速化することによって、工具すくい面-切り屑界面の

温度が高温化する。このとき通常の工具では、加工点近傍ではクーラントは膜沸騰状態となるため、工具の加工点近傍における冷却効果は低下するものの、工具内部での温度勾配は緩やかとなる(図6(a))。その一方で、高圧クーラントを用いた場合、クーラントは膜沸騰領域を打ち破り、接触領域近傍まで工具を冷却することが可能となるが、その結果として高温となる接触領域とクーラントによって冷却される領域における温度ギャップが大きくなり、同部で歪みが発生することによって、亀裂が発生したものと考えられる(図6(b))⁸⁾。

3-3 高圧クーラントに適した工具の材料組織構造

前述のように、高圧クーラントを援用したInconel 718の高速切削加工においては、cBN工具母材内に発生する温度勾

配に起因した熱亀裂が発生する。この熱亀裂は、高温部と低温部における熱膨張量の差によって発生する応力に起因していることから、使用する工具の熱膨張率に大きな影響を受けることが予想される。

ここで、cBN工具の特性はcBN含有率、バインダー材種、cBN粒径などの材料組織構造に強く依存することが知られている。cBN工具の材料組織構造は、大きく分けて高cBN含有率工具、低cBN工具に分類される(図7)。高cBN含有率工具(図7(a))は、cBN粒子を90%以上含み、高硬度、高熱伝導率といった優れた機械的特性を持っている。その一方で、低cBN含有率工具(図7(b))は、cBN含有率は60%前後であるが、バインダーにセラミックスを使用していることから、優れた耐反応性・耐熱性を発現する。熱的な摩耗が支配的となるInconel 718の高速切削加工においては、主に低cBN含有率工具が優れた耐摩耗性を示すことが知られており⁹⁾、前節までの結果も、低cBN含有率工具を用いた場合の結果を示している。

一方で、セラミックスとcBN粒子の熱膨張率を比較した場合、前者は $9.35 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であるのに対して、後者は $2 \sim 5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度と極めて小さく、熱膨張率の小さなcBN粒子を多く含む高cBN含有率工具では、熱膨張量を低減することで熱亀裂を抑制することが期待できる⁸⁾。

図8は、高cBN含有率工具、低cBN含有率工具を使用した場合について、クレーター摩耗量とクーラント圧力の関係を示している。同図に示すように、いずれのクーラント圧力条件下においても、従来知見のとおり低cBN含有率工具が優れた耐摩耗性を示している。その一方で、図9は加工後の高cBN含有率工具の工具すくい面の状態を示しているが、低cBN含有率工具では亀裂が発生していた加工条件(切削速度500m/min×クーラント圧力20MPa)においても、高cBN含有率工具については亀裂の発生を抑制できていることが分かる。また、工具の耐摩耗性に関しても、クーラント圧力3MPaと

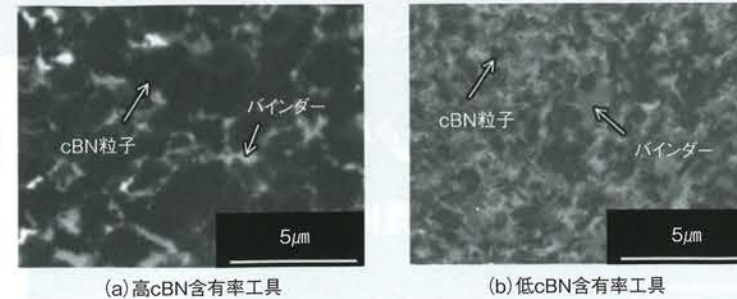


図7 cBN工具の材料組織構造

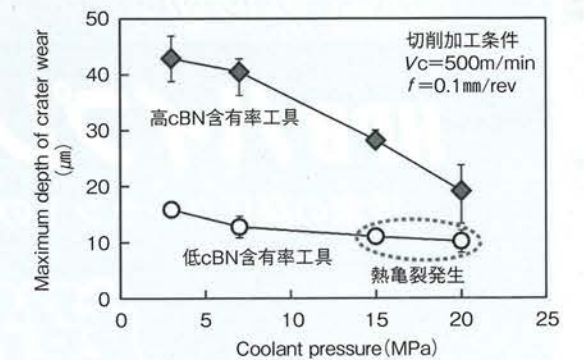


図8 cBN材料組織構造の摩耗への影響

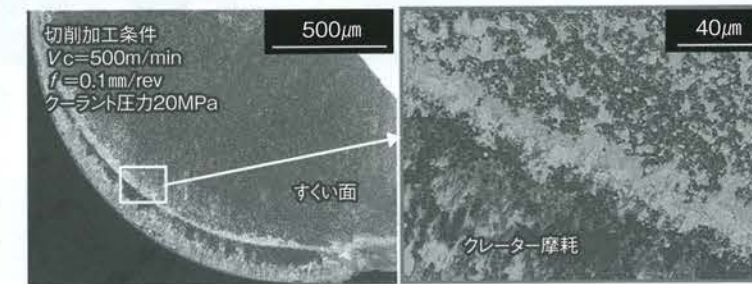


図9 高cBN含有率工具の加工後のすくい面

20MPaにおける摩耗量を比較した場合、低cBN含有率工具では25%程度の低減に留まっている一方で、高cBN含有率工具は60%程度も摩耗が抑制されている。

この結果は、熱伝導率が高くクーラントの冷却効果の恩恵を受けやすい高cBN工具では、さらなるクーラントの高圧化が実現した場合、低cBN含有率工具を上回る摩耗抑制効果が得られる可能性があることを、示唆していると言える。

以上のように、クーラントの高圧化に伴い顕在化する課題が存在する一方で、それぞれのクーラント圧力条件下に適した工具の材料組織構造が存在し、適切な工具材種の選択・開発によって、さらなる高精度・高能率加工が可能になることが明らかとなっている。

4. おわりに

近年の難削材の高精度・高能率加工への要求の高まりに応じて、切削工具やその周辺技術についても日進月歩で進化している。本稿で解説した高圧クーラント技術は、難削材の高精度・高能率加工を実現し得る極めて有力な手法である一方で、クーラントの高圧化によって新たに

顕在化する課題も存在することは、本稿で述べたとおりである。高圧クーラントを含めた先進切削加工技術を活用し、その潜在能力を最大限に引き出すためには、工具-切り屑界面における現象そのものをしっかりと理解することが何より重要であると考えられる。

本稿に掲載した研究を遂行するにあたり多大な協力をいただいた、トクビ製作所に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) E.A. Loria : 1988, The status and prospects of alloy 718, JOM, Vol. 40, No.7, pp. 36-41.
- 2) RJS. Pigott, AT. Colwell : 1952, Hi-Jet System for Increasing Tool Life, SAE Technical Papers, Vol. 6, pp. 547-566.
- 3) R. M'Saoubi, D. Axinte, SL. Soo, C. Nobel, H. Attia, G. Kappmeyer, S. Engin, WM. Sim: High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials, 2015, CIRP Annals, Vol. 64, pp. 557-580.
- 4) ZC. Lin, DY. Chen : 1995, A study of cutting with a CBN tool, J. Mater. Process. Technol., Vol. 49, pp. 149-168.
- 5) Y. Huang, YK. Chou, SY. Liang : 2007, CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses, Int. J. Adv. Manuf.

- 6) I.A. Choudhury and M.A. El-Baradi : 1998, Machinability of nickel-9 4 base super alloys: a general review, J. Mater. Process. Tech., Vol. 95 77, No.1-3, pp. 278-284.
- 7) AS. Kumar, M. Rahman, SL. Ng : 2002, Effect of High-Pressure Coolant on Machining Performance, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 20, pp. 83-91.
- 8) LC. Hsin, T. Sugihara, T. Enomoto : 2020, High speed machining of Inconel 718 with high pressure coolant focusing on material structures of CBN tools, Int. J. Autom. Technol., Vol. 14, No.6, pp. 1045-1050.
- 9) JP. Costes, Y. Guillet, G. Poulachon, M. Dessoly : 2007, Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in cutting of Inconel 718, Int. J. Mach. Tools. Manuf., Vol. 47, pp. 1081-1087.