

2015年11月(生産研究 第67巻 第6号抜刷)

Reprinted from

"SEISAN-KENKYU" VOL. 67, NO.6

高圧クーラントを用いた高速切削の動向と最新のトピックス

State of the Art in High Speed Machining with High Pressure Coolant

帯川利之・森合主税・松本航・林 遵

Toshiyuki OBIKAWA, Chikara MORIGO, Wataru MATSUMOTO and Mamoru HAYASHI

東京大学生産技術研究所
INSTITUTE OF INDUSTRIAL SCIENCE, THE UNIVERSITY OF TOKYO

高圧クーラントを用いた高速切削の動向と最新のトピックス

State of the Art in High Speed Machining with High Pressure Coolant

帯川 利之*・森合 主税**・松本 航***・林 遵*

Toshiyuki OBIKAWA, Chikara MORIGO, Wataru MATSUMOTO and Mamoru HAYASHI

要 旨

成熟した持続的な社会の発展に向けて、ジェットエンジンやガスタービンなどの需要が高まっており、これらの製品に使用されているチタン合金やニッケル基超耐熱合金等の難削材を高効率に切削加工する技術の開発が求められている。本論文では、難削材切削加工の主要な技術として、近年注目を集めている高圧クーラントの利用技術開発の動向と最近の話題を紹介する。期待される効果としては、効率的な切りくず破断、工具の長寿命化、高精度化、仕上げ面の高品位化、低コスト化である。最後にクーラントの冷却効果を飛躍的に高める方法について議論する。

Abstract

High pressure coolant is expected to dramatically improve the machinability of difficult-to-machine materials and develop new strategic approaches to high speed machining. This paper reviews high speed machining technology with high pressure coolant with regard to chip breakage, reduction of tool wear and drilling technology without pecking cycles. The film boiling of coolant near the tool tip due to high tool temperature is discussed based on the results of cutting experiments of stainless steel.

1. は じ め に

省エネルギー化、グローバル化、急速に進む高齢化に対応するため、近年、高効率なガスタービンや航空機、ジェットエンジン、さらには、機能的で安全な医療生体用部品等の需要が急増している。これらの製品、部品にはチタン合金やニッケル基超耐熱合金などの切削が困難な材料が多用されており、金属系難削材のさらなる高速・高効率切削が求められている。これを実現するためには工作機械、工具、切削加工技術の総合的な研究が必要であるが、切削加工技術の中で特にクーラントの利用技術の開発と実用化が遅れており、クーラントによる新しい冷却・潤滑技術の動向に世界的な関心が集まっている¹⁻⁴⁾。

クーラントの利用技術開発において、図1に示すように、現在ふたつの方向が検討されている。ひとつは液体窒素や液体二酸化炭素をクーラントとして利用する低温切削加工技術である^{5,6)}。極低温の液体窒素は冷却能力が高く、しかも廃液の発生しないエミッションフリーの地球環境に優しいクリーンな切削加工技術として注目されている。もう

ひとつは、高圧クーラントを利用した高速切削加工技術である。高圧クーラントは1990年代に高速高効率加工のための新しい要素技術として本格的な研究が開始され、着実に成果が積み重ねられてきた^{7,8)}。我が国でも幾つかの成果が報告されたが⁹⁾、残念なことに欧米ほどには注目されなかった。当時は難削材の切削量が非常に少なく、また工作機械のクーラントの配管系が高圧クーラントに対応していなかったためである。

最近では、多くの工作機械が7 MPaまでの高圧クーラントに対応するようになり、高圧クーラントにたいする関

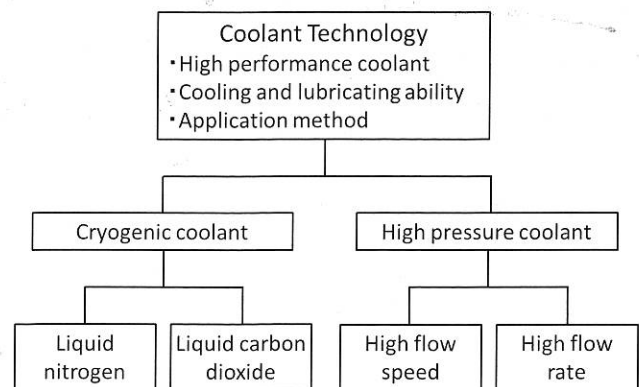


図1 クーラントの利用技術におけるふたつの方向性

*東京大学生産技術研究所 機械・生体系部門

**株式会社トクビ製作所

***東京大学大学院 工学系研究科

心が一段と高まっている。さらに、高速切削加工において極低温の液体窒素に対する高圧クーラントの優位性が報告されるようになった¹⁰⁾。両者の違いは流速と流量にあり、極低温の液体窒素の場合、大量のクーラントを高速で工具刃先に供給することが困難なためである。こうした技術的背景のもと、高圧クーラントをより効果的に使用するための検討が進められている。その技術開発のひとつが、7 MPa より高圧のクーラントの効果の検証である。圧力 7 MPa はインチポンド系で 1000 psi に相当し、この値が現時点での高圧の標準となっている。しかし、7 MPa のクーラントでも期待通りの切削状態が得られない場合があり、さらに高い圧力での切削実験が進められている。

上述のように高圧クーラントの研究は既に四半世紀にわたり行われてきたが、研究すべきことはまだまだ多く残されており、図 2 のように工具摩耗の低減、切りくずの分断、仕上げ面品位の向上の他、新しい加工技術の開発に関する研究成果などが期待されている。ちなみに Web of Science で「高圧クーラント」と「切削」をキーワードとして研究論文を検索した結果、1991 年から 2015 年までの 25 年間に発表された論文数は高々 40 編であり、高圧クーラントに関する科学技術情報は、十分とはいえない。5 年毎に区切ってその間に発表された論文数を調べると、4 編、4 編、9 編、10 編、13 編であった。21 世紀に入り、研究論文が増えているとはいうもの切削実験に基づく現象論的な研究が多い。高圧クーラントを用いた高速高能率切削加工技術において欧米に後れをとっている現状では、新しい加工技術を牽引する革新的な研究が求められている。

本研究解説では、高圧クーラントを用いた高速切削加工技術の最新の動向を述べるとともに、我々の研究室で行っているクーラントに関連した研究トピックスを紹介する。

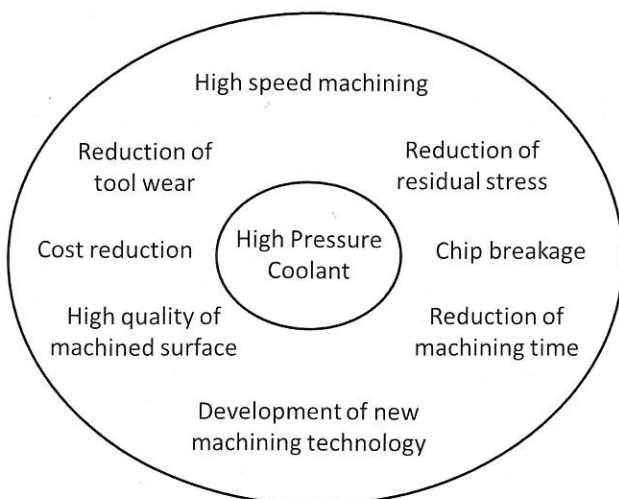


図2 高圧クーラントの期待される効果

2. 切りくず破断

刃先交換式のインサートには、旋削で切りくずを破断するためのブレーカ溝が付けられており、所定の切込みと送りに対し最適なブレーカ形状が推奨されている。しかしニッケル基超耐熱合金やステンレス鋼、チタン合金、あるいは、炭素量の非常に少ない軟鋼は大変ねばく折れにくいいため、ブレーカ溝が有効に作用しないことが少なくない。折れずに連続して生成する長い切りくずは、工具や工作物に絡みつくと多く、工具の折損や工作機械の故障の原因となり大変危険である。そのため、作業者による監視が不可欠であり、工作機械の無人運転の妨げとなっている。高圧クーラントは、こうした状況を改善し、高い圧力で切りくずを確実に分断する。またその信頼性も高いが、切りくずの破断と破断した切りくずの長さや形態は、圧力の影響を受けるため、高圧クーラントの圧力設定には注意が必要である。

ところで、切りくずの形態は、大分以前の分類になるが、INFOSによって次の10種類に分類された¹¹⁾。1. リボン状切りくず、2. もつれた切りくず、3. 平らならせん状切りくず、4. 斜めのらせん状切りくず、5. 長い円筒らせん状切りくず、6. 短い円筒らせん状切りくず、7. うずまきらせん状切りくず、8. うずまき状切りくず、9. ちぢれた切りくず、10. 破碎切りくずであり、番号が増えるにしたがい切りくずは短くなる。また近年、非常に高い圧力のクーラントを使用すると破碎切りくずより細い針状切りくずが発生することが確認された。そこで、以下では11. 針状切りくずを追加し、11種類の切りくずに分類することとした。このうち、良好な切りくず形態は6から8である。分類番号9、10、11の細かい切りくずは、工具や工作物に絡みつくとはいないが、細かすぎて工作機械から排出が容易でない。さらに、11の針状切りくずは、工作機械の案内面に入り込み、案内面を損傷させる可能性がある。

ステンレス鋼 SUS304 の外周切削の場合、クーラントの圧力が1 MPa から 20 MPa に増加するにつれて切りくずは図3のように短くなる。高圧クーラントが作用すると切りくずのカーブが弱くなりらせん形状やうずまき形状が現れにくい。長さをもとに上記分類に対応させると長い円筒らせん状切りくず (1 MPa) から短い円筒らせん状切りくず (7 MPa)、うずまきらせん状切りくず (20 MPa) へと変化したことになる。良好な形態の切りくずを排出するには7 MPa という標準的な高圧クーラントで十分である。これに対し、鍛造品の SCM435 の場合は状況が異なる。図4のように、低圧のクーラント (通常は 0.3-0.7 MPa) を使用する通常の湿式切削では、切りくずが工作物に絡みつくと大変危険な状態である。クーラントの圧力を高圧の 7 MPa にあげても、長い連続した切りくずが発生し工作物に絡みつくと、図3の SUS304 とは大きな違いがある。さ

らに圧力をあげ 14 MPa になると切りくずは短く分断され、トラブルのない安全な切削を行うことができる。

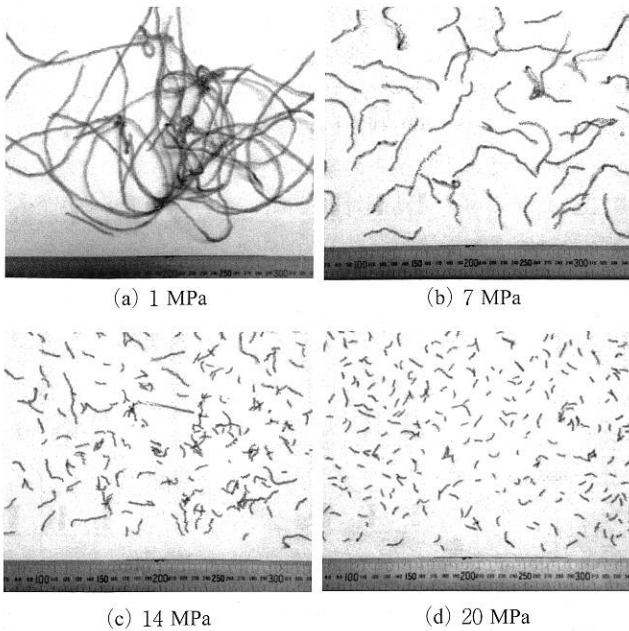
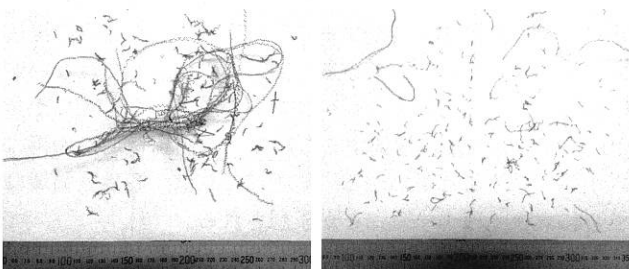


図3 ステンレス鋼 SUS304 の切りくず形態に及ぼすクーラントの圧力の効果



(a) 通常の湿式切削 (低圧)



(b) 7 MPa (c) 14 MPa

図4 合金鋼 SCM435 の切りくず形態に及ぼすクーラントの圧力の効果

切りくず形態に及ぼす高圧クーラントの効果を俯瞰するため文献調査を実施し、クーラントの圧力と生成した切りくずの形態分類番号との関係をとりまとめ、図5に示し

た。三角印がニッケル基超耐熱合金 Inconel 718^{1, 7, 13, 14, 19, 20}、丸印がチタン合金 Ti-6Al-4V^{12, 15, 18, 21} と Ti555-3²²、四角がオーステナイト・フェライト系ステンレス鋼 SUS329J3L¹⁶、ひし形が高硬度のピストンロッド¹⁷の結果を示している。なお、クーラントを使用しない乾式切削に対してはクーラント圧力を0に、圧力を明記していない通常の湿式切削に対しては圧力を0.5とした。ただし、多くの結果が集まる場所では、それぞれの印が重ならないように圧力と分類番号を少しずらして表示した。また良好な切りくず形態は6から8といわれているが、分類番号9のちぢれた切りくずも許容できる形態とし、図5では6から9の範囲を点線で囲んでいる。

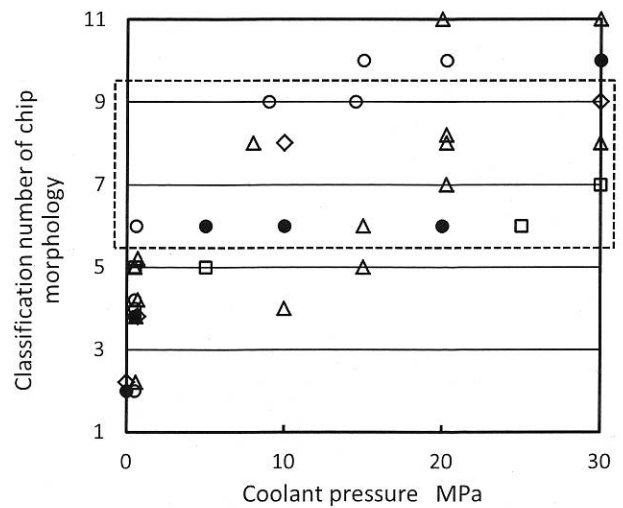


図5 切りくず形態 (INFOS による) に及ぼすクーラントの圧力の効果 (ニッケル超耐熱合金, チタン合金, ステンレス鋼, 合金鋼)

図5の結果より、高圧クーラントを使用すると、通常の湿式切削では長く折れにくい切りくずが分断され、概ね良好な形態の切りくずが生成されることがわかる。しかし、Inconel 718では、切削条件によっては10 MPaでも良好な分断された切りくず形態にならない場合があること、圧力が20 MPa以上では細くなりすぎ針状の切りくずが発生する場合があることなど、クーラントの圧力の設定が難しい。ステンレス鋼 SUS329J3Lも Inconel 718ほどではないが、5 MPaでは圧力が不十分である。本ステンレス鋼は、炭素量が0.03%と非常に少ないため、折れにくい。図4のSCM435も同様であるが、高圧クーラントの適切な圧力設定が大変重要である。

3. 工具 摩 耗

チタン合金やニッケル基超耐熱合金の高速切削が難しい最も大きな理由は切削温度である。これらの材料は高強度であるだけでなく、熱伝導率の値が小さいため、切削温度

が上がりやすい。高压クーラントは切削温度を低下させ高速切削を実現させる有力な手段であるが、最近、その効果が定量的に確認されるようになってきた。工作物はクロムモリブデン鋼であるが、切削速度 350 m/min で旋削した時の高压クーラントによる温度の低下が Klocke らにより赤外線 2 色温度計で測定された²³⁾。ただし、すくい面温度を直接測ることはできないので、すくい面から 0.15 mm だけ内側の工具内の温度を測定している。その結果によれば、通常の湿式切削での温度に比べ、4 MPa の高压クーラントをすくい面だけに噴射した場合には 200°C、すくい面と逃げ面の両方に噴射した場合には 300°C の大幅な温度の低下が確認された。

高压クーラントでなくともノズルを絞り低压クーラントの流速を上げるだけで工具摩耗の低減に十分な効果が現れる。図 6 に示すように、工具ホルダー先端部にノズルを設け、8 mm 離れた刃先に向かって直接クーラントを噴射する²⁴⁾。こうしたジェットクーラントを用いることにより、クーラントを工具刃先近くまで送り届けることが可能となり、工具は効率的に冷却される。

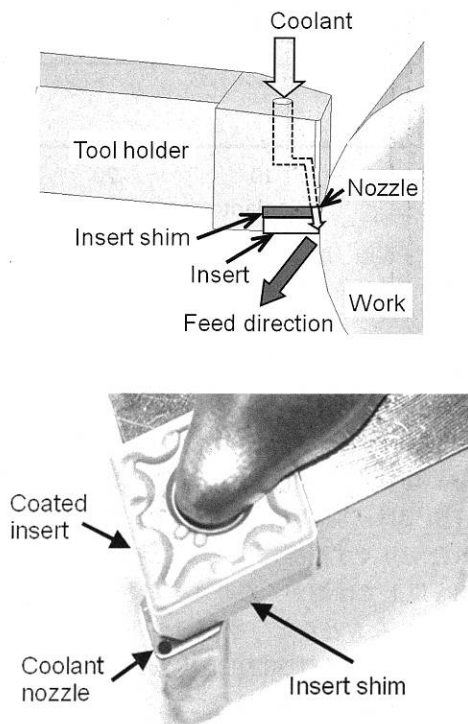


図 6 ジェットクーラント切削の概略図と使用したクーラントノズル付の工具ホルダー²⁴⁾

ジェットクーラントにおける工具摩耗の進行状況を一例を図 7 に示す²⁴⁾。工作物はステンレス鋼 SUS304、工具は ISO 規格で M35 相当のグレードのチタン化合物の多層コーテッド超硬である。横軸は切削距離、縦軸は最大逃げ面摩耗幅 VBmax であり、最大逃げ面摩耗幅が 0.2 mm に達

した時に工具寿命と判定する。四角印で示した通常の湿式切削の結果と比較して、黒丸印のジェットクーラントでは工具摩耗が緩やかに増大し、工具寿命に達するまで約 2 倍の距離を切削することができる。高压のジェットクーラントを使用すれば、一般に冷却効果がさらに高まるが、圧力を上げ過ぎると、却って工具寿命が短くなる例も少なからず報告されている^{7,13,14,18)}。境界摩耗が高压クーラントによって促進されることがその原因のひとつである。また荒削りでのセラミック工具に対しては、高压クーラントが悪影響を及ぼすことも確認されている²⁵⁾。

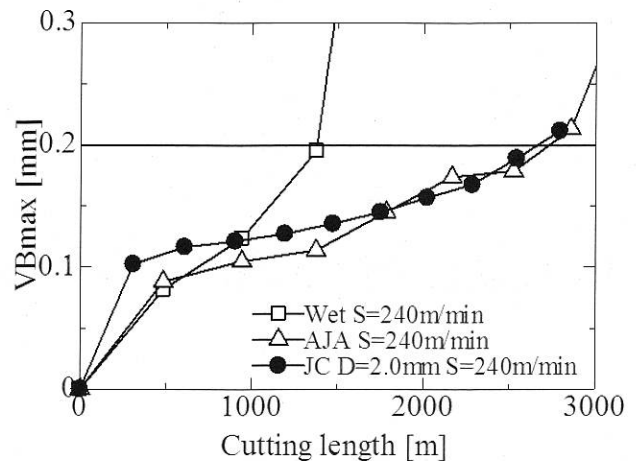


図 7 図 6 のジェットクーラントを用いた時の工具摩耗進行曲線²⁴⁾。切削速度 240 m/min。

工具刃先の冷却は、クーラントの刃先への浸透状態に強く依存する。しかしジェットクーラントの刃先近傍への到達状況については、直接的な測定が難しくこれまで全く評価することができなかった。そこで逃げ面の刃先近傍に定常的な膜沸騰領域を想定した、図 8 に示す新しいクーラントの浸透モデルを提案した²⁶⁾。膜沸騰領域の端ではクーラントの炭素成分の焦げ痕が出現するため、工具切れ刃から焦げ痕までの距離を測定することによりクーラントの浸透限界を評価することができる。高压側のデータではないが、図 9 に測定結果を示す。クーラントの圧力が 0.1 MPa から 0.3 MPa にわずかに増加するだけで、膜沸騰領域が大幅に縮小していることがわかる。高压になれば、膜沸騰領域はさらに大きく縮小することが予想される。

ところで、図 6 のように逃げ面側からクーラントをかける場合、クーラントの刃先への浸透を妨げるものがないので、クーラントは刃先に到達すると想定するのがこれまでの常識であった。しかし通常の湿式切削に相当する条件でクーラントの刃先への浸透を数値流体解析で求めたところ、クーラントの流速が遅いと刃先から 400 μm 程度、クーラントの速度が早くても刃先から 100 μm 程度までしか浸透しないことが明らかとなった²⁷⁾。図 8 に示すように、刃先

近傍における工具逃げ面と仕上げ面の隙間は数十マイクロン（刃先からの距離の約 1/10）しかなく、仕上げ面がクーラントの浸透方向と逆向きに高速で移動してクーラントをかき出す作用をするためである。このことから高压クーラントの効果を最大限に利用するには、クーラントの速度が低下しないよう刃先に向かって直接噴射することが極めて重要である。

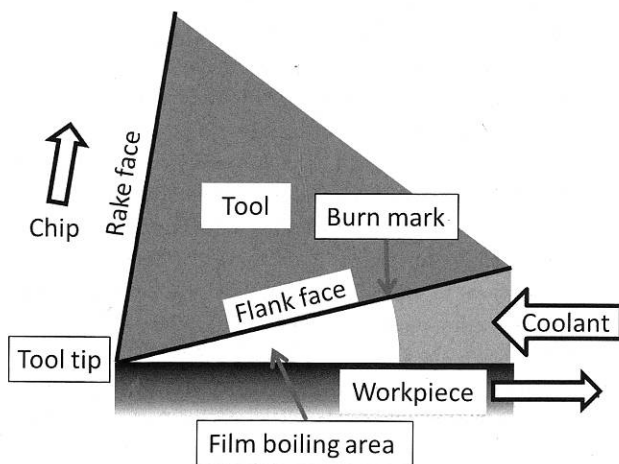


図8 逃げ面における膜沸騰と焼け痕の位置関係²⁶⁾

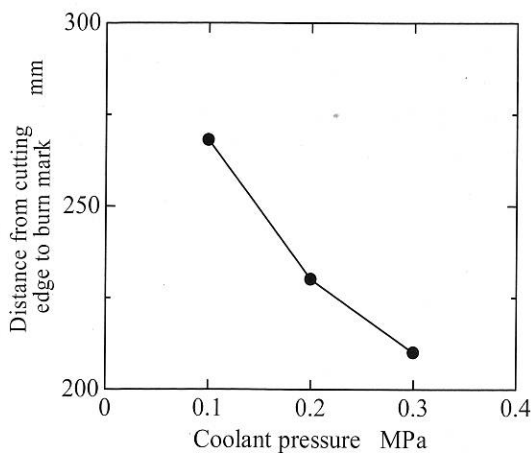


図9 クーラントの圧力と膜沸騰領域の大きさの関係²⁶⁾

4. おわりに

本研究解説では、クーラントに関連する技術の動向を紹介するとともに、高压クーラントによる切りくず破断について詳述した。ニッケル基超耐熱合金やチタン合金あるいは炭素量の少ないステンレス鋼等、大変ねばい工作物の切削では切りくずが折れにくいいため、高压クーラントをチップブレーカの代わりに使用することができる。しかし確実に良好な切りくずを生成するためには、切削条件に対応した適切なクーラントの圧力設定が大変重要である。

次に、高压クーラントによる工具摩耗の低減に関し、新しい工具刃先の冷却モデルを提案した。本モデルでは、刃先での定常的な膜沸騰を想定しており、沸騰膜の端に出現するクーラントの炭素成分の焼け痕からクーラントの浸透限界を評価している。高压クーラントによって工具逃げ面と仕上げ面のすきまへの侵入速度が増大することにより、浸透限界が大きく縮小するが、それだけでなく、工具の形状を最適化することにより浸透限界をさらに縮小し、摩耗の大幅な低減に寄与することも不可能ではない。

それではどのような切削に対し高压クーラントは最も効果的に作用するか。本稿の終わりにあたり、少し実用的な観点からこの問題を考えてみたい。その答えは、当然のことながら、どのような切削トラブルを想定するか、何を評価基準にとるかによって変わってくる。Birminghamら²⁸⁾によれば、コストの削減、加工時間の短縮の観点から高压クーラントを評価すると、ドリルによる深穴の加工においてその効果は最も大きくなる。深穴の程度は穴の深さ L と直径 D との比 L/D によって表される。高压クーラントを油穴を通してドリルの先端から噴出させると、 L/D が 50 を超える場合でも普通通りの穴あけが可能になる。高压クーラントでなければ、穴あけの途中で頻りにドリルを引き上げて切りくずを穴から排出させるベッキングが必要になるが、高压クーラントによりこの工程を省略することで、加工時間が 1/10 程度に短縮される。高压クーラントはこのように従来の常識を変える可能性を有しており、深穴加工だけでなく、新たな切削加工技術の開発が期待される。

(2015年9月4日受理)

参考文献

- 1) Lauwers, B., et al., 2014, Hybrid processes in manufacturing, CIRP Annals, 53, pp. 561-583.
- 2) Pervaiz, S., et al., 2014, Influence of tool materials on machinability of titanium- and nickel-based alloys: a review, Mat. Manuf. Proc., 29, pp. 219-252.
- 3) Pramanik, A., 2014, Problems and solutions in machining of titanium alloys, Int. J. Adv. Manuf. Tech., 70, pp. 919-928.
- 4) Ezugwu, E.O., 2005, Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, Int. J. Mach. Tools Manuf., 45 pp. 1353-1367.
- 5) Dhananchezian, M. and Pradeep Kumar, M., 2011, Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts, Cryogenics, 51, pp. 34-40.
- 6) Machai, C. and Biermann, D., 2011, Machining of titanium-alloy Ti-10V-2Fe-3Al under cryogenic conditions: cooling with carbon dioxide snow, J. Mat. Proc. Tech., 211, pp.1175-1183
- 7) Ezugwu, E.O. and Bonney, J., 2004, Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools, J. Mat. Proc. Tech., 153, pp. 1045-1050.
- 8) Ezugwu, E.O., et al., 2009, High productivity rough turning of ti-6al-4v alloy, with flood and high-pressure cooling, Trib.

- Trans., 52, pp. 395-400.
- 9) 新井 実, 小川 誠, 1997, チタン合金のドリル加工における高圧給油の効果, 軽金属, 47, pp. 139-144.
 - 10) Bermingham, M.J., et al., 2012, A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in Ti-6Al-4V cutting, J. Mat. Proc. Tech., 212, pp. 752-765.
 - 11) 中山一雄, 1972, 切りくず形状の分類について, 精密機械, 42, pp. 74-80.
 - 12) Machado, A.R., et al., 1998, Tool performance and chip control when machining Ti6Al4V and Inconel 901 using high pressure coolant supply, Mach. Sci. Tech., 2, pp. 1-12.
 - 13) Ezugwu, E.O. and Bonney, J., 2005, Finish Machining of Nickel-Base Inconel 718 Alloy with Coated Carbide Tool under Conventional and High-Pressure Coolant Supplies, Trib. Trans., 48, pp. 76-81.
 - 14) Ezugwu, E.O., et al., 2005, Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures, J. Mat. Proc. Tech., 162-163, pp. 609-614.
 - 15) Palanisamy, S., et al, 2009, Effects of coolant pressure on chip formation while turning Ti6Al4V alloy, Int. J. Mach. Tools Manuf, 49, pp. 739-743.
 - 16) Braham-Bouchnak, T., et al, 2010, High pressure water jet assisted machining of duplex steel: machinability and tool life, Int. J. Mat. Form., 3, pp. 507-510.
 - 17) Kramer, D., et al., 2010, Capability of high pressure cooling in the turning of surface hardened piston rods, J. Mat. Proc. Tech., 210, pp. 212-218.
 - 18) Klocke, F., et al., 2011, Influence of a high-pressure lubricoolant supply on thermo-mechanical tool load and tool wear behaviour in the turning of aerospace materials, J. Eng. Manuf., 225, pp. 52-61.
 - 19) Vagnorius, Z. and Sørby, K., 2011, Effect of high-pressure cooling on life of SiAlON tools in machining of Inconel 718, Int. J. Adv. Manuf. Tech., 54, pp. 83-92.
 - 20) Çolak, O., 2012, Investigation on machining performance of Inconel 718 under high pressure cooling conditions, J. Mech. Eng., 58, pp. 683-690.
 - 21) da Silva, R.B., et al., 2013, Tool life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressures, J. Mat. Proc. Tech., 213, pp. 1459-1464.
 - 22) Braham-Bouchnak, T., et al., 2015, Influence of high-pressure coolant assistance on the machinability of the titanium alloy Ti555-3, Mach. Sci. Tech., 19, pp. 134-151.
 - 23) Klocke, F., et al., 2014, The influence of high-pressure lubricoolant supply variant on cutting performance in turning of 42CRMO4+QT, Proc. 11th Int. Conf. High Speed Mach., Prague, (2014), CD-ROM.
 - 24) Nakatsukasa, R., et al., 2013, High speed machining of stainless steel using low-pressure jet coolant, Proc. 7th Int. Conf. Lead. Edge Manuf. 21st Cent., Matsushima, pp. 255-258.
 - 25) Ezugwu, E.O. and Bonney, J., 2003, Effect of High-Pressure Coolant Supplies when Machining Nickel-Base, Inconel 718, Alloy with Ceramic Tools, Trib. Trans., 46, pp. 580-584.
 - 26) Matsumoto, W., et al., 2015, Influence of tool shapes on the cutting performance under jet coolant conditions, Proc. 8th Int. Conf. Lead. Edge Manuf. 21st Cent., Kyoto, in print.
 - 27) Obikawa, T. and Yamaguchi, M., 2013, Computational fluid dynamic analysis of coolant flow in turning, Procedia CIRP, 8, pp. 270-274.
 - 28) Bermingham, M.J., et al., 2014, Advantages of milling and drilling Ti-6Al-4V components with high-pressure coolant, Int. J. Adv. Manuf. Tech., 72, pp. 77-88.