

航空・宇宙産業用難削材の高速・高精度切削加工



研究ノート

杉原 達哉*, 榎本 俊之**

High performance machining of difficult-to-cut materials for aviation industry

Key Words : High performance machining, difficult-to-cut materials, aviation industry

はじめに

今日までの産業の発展を陰ながら支えているのが、様々な機械加工技術の進歩である。例えば、ジェームス・ワットは1769年に蒸気機関を発明したが、当初はピストン/シリンダーの加工精度が低く、蒸気漏れを起こして理論上の性能を発揮するには至らなかった。この問題を解決したのが、シリンダ内径の高精度加工を実現したウィルキンソンの中ぐり盤であり、このウィルキンソンの発明が無ければ、ワットの発案は『素晴らしい思いつき』で終わっていた可能性すらある¹⁾。このように、機械加工は様々なアイデアを具現化する上で必要不可欠な技術であると同時に、“もの”に多種多様な付加価値を与える極めて強力なツールであると言える。

今日の産業界においても、様々な分野で加工技術の革新が要求されているが、その代表的な分野の一つが航空・宇宙産業分野である。近年の航空・宇宙

産業分野では、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、近年の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(図1)²⁾。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、航空機・宇宙機器部品の高コスト・低生産性の原因となっている。

こういった現状を打破するために、著者らの研究グループでは、切削工具や加工方法、切削油剤など、切削加工を構成する様々な要素に対して革新的技術の提案・構築を図ることで、難削材の高精度・高能率切削加工の実現を目指している。本稿では、Ni基超耐熱合金の高速切削加工に向けた研究事例について紹介する。



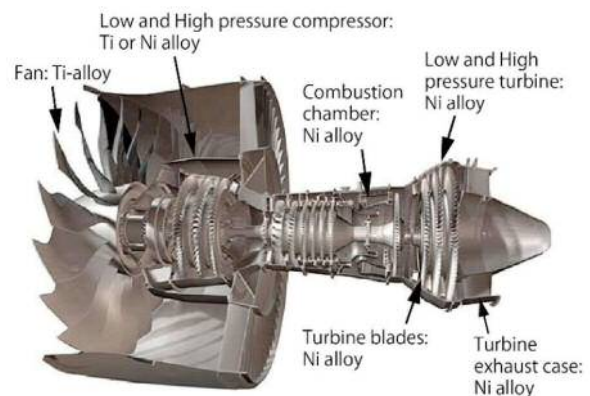
* Tatsuya SUGIHARA

1985年7月生
大阪大学 大学院工学研究科 機械工学
専攻 博士後期課程 (2012年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 機
械工学専攻 講師 博士(工学)
生産工学, 加工学
TEL: 06-6879-7287
FAX: 06-6879-7287
E-mail: t-sugihara@mech.eng.osaka-u.ac.jp



** Toshiyuki ENOMOTO

1985年7月生
東京大学大学院 工学系研究科 修士課
程 (1990年), 博士後期課程 (1999年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 機
械工学専攻 教授 博士(工学)
生産工学, 加工学
TEL: 06-6879-7340
FAX: 06-6879-7340
E-mail: enomoto@mech.eng.osaka-u.ac.jp

図1 航空機用ジェットエンジンの材料構成²⁾

CBN 工具を用いた Inconel 718 の高速切削加工
Inconel 718 は航空・宇宙関連機器で用いられる

代表的な Ni 基超耐熱合金であるが、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代表的な難削材として知られている。したがって、例えば既存の超硬合金製工具を使用する場合は、切削速度 40 m/min 程度の低速切削速度域で加工が行われているのにも関わらず、工具寿命は極めて短命となっている。その結果、長さ約 1 m 程度の Ni 基合金製タービンブレードの荒加工 / 仕上げ加工には、現状では約 7 時間以上の時間を要しているだけではなく、その間には 40 回以上の工具交換が行われており²⁾、これらの材料を高速かつ高精度で加工するための技術の確立が強く求められている。そこで期待を集めているのが、CBN (立方晶窒化ホウ素) の焼結体を用いた CBN 工具である。CBN はダイヤモンドに次ぐ高い硬度と熱伝導率を示す材料であり、Ni 基超耐熱合金の切削加工においても切削速度 100 m/min 程度の高速切削加工を実現している。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約 5 ~ 10 倍程度であることを考慮すると、より高速な加工条件下でのパフォーマンス向上が強く求められている。

そこで著者らは、まず Inconel 718 の超高速切削加工条件 (切削速度 300 m/min) における CBN 工具の摩耗メカニズムの解明を試みた³⁾。図 2 は、同条件下における、切削距離の増加にともなう CBN 工具の刃先後退量の推移を示している。同図からわかるように、加工開始直後 (切削距離 0 m ~ 約 140 m) の CBN 工具は安定的に摩耗が進行しているのに対し、

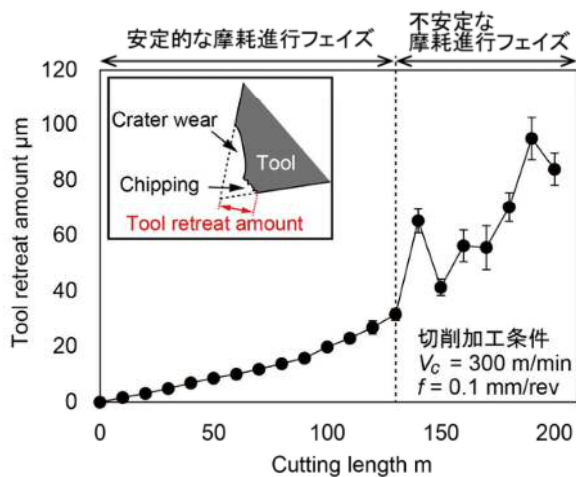


図 2 Inconel 718 の高速切削における CBN 工具の刃先後退量推移

切削距離の増加にともない、刃先後退量の推移が不安定化していることがわかる (切削距離約 140 m ~)。そして、著者らが明らかにした CBN 工具の摩耗進行プロセスを図 3 に示す。加工開始直後の CBN 工具は、すくい面・逃げ面において工具-被削材間の拡散反応を主要因とするクレータ摩耗・逃げ面摩耗が発生し (図 3 (b))、比較的安定的に工具摩耗が進行する。それと同時に、逃げ面摩耗の進行によって被削材との接触面積が増加することで、逃げ面側に著しい切りくず凝着が生じる (図 3 (c))。そして、一定以上の大きさに成長した凝着物は工具逃げ面から脱落し、凝着物の脱落と同時に工具母材が剥離することで、工具が大きく欠損する (図 3 (d))。さらに、欠損部分で凝着物の堆積および脱落が繰り返されることで、工具刃先は大きく後退していく (図 3 (e))。

以上のように、Inconel 718 の高速切削加工時における CBN 工具は、切削距離の増加にともない安定的な摩耗進行フェイズから不安定な摩耗進行フェイズへと移行し、それぞれのフェイズにおける摩耗の主要因も全く異なるものであることが明らかとなった。

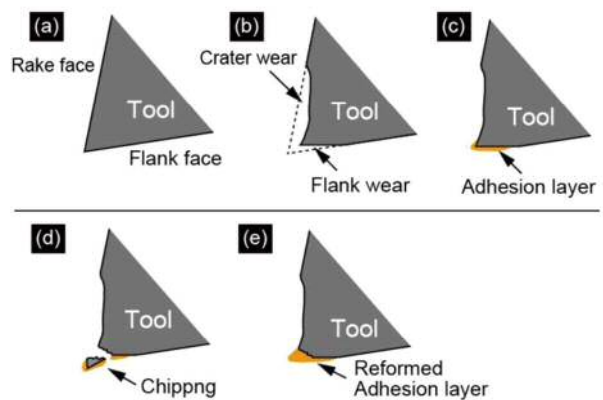


図 3 Inconel 718 の高速切削における CBN 工具の摩耗進行プロセス

微細表面テクスチャを有する CBN 工具の開発

従来の切削工具では、工具-被削材間の潤滑性を高めることを目的に、工具表面は研磨仕上げなどの平滑化が行われてきた。著者らはこういった従来知見とは全く逆に、工具表面に微細な三次元周期構造を付与することで、優れた耐凝着性や耐摩耗性、潤滑性を発現する切削工具、すなわち微細表面構造 (微細表面テクスチャ) を有する高機能切削工具を提案・

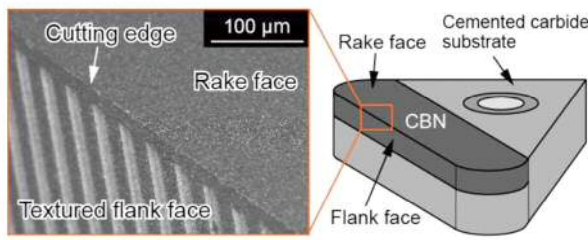


図4 微細表面テクスチャを有するCBN工具³⁾

開発している。そして、工具に形成された微細表面テクスチャは、“切削油剤のMicro poolとしての効果”、“硬質摩耗粒子のMicro pocketとしての効果”、“接触面積の低減効果”などの様々な効果を発現することによって、様々な材料の加工において切削工具の耐摩耗性や耐凝着性を著しく向上させることが可能であることを明らかにしてきた^{4),5)}。

そして本研究では、Inconel 718の高速切削加工時におけるCBN工具欠損の主要因の一つが、逃げ面側への被削材の凝着と、その脱落にともなう工具母材の剥離であるとの考えに基づき、図4に示すような逃げ面に微細な周期溝構造を有するCBN工具を新たに開発した。工具逃げ面に形成された微細周期溝構造は、“凝着物に対するアンカー効果”という機能を発現することによって、凝着物の脱落とそれともなう工具母材の剥離を抑制することが期待できる。図5は、従来の平滑な逃げ面を有するCBN工具、ならびに開発したCBN工具を用いて切削加工実験を行った結果である。同図に示すとおり、開発工具を用いた場合、工具は不安定な摩耗進行フェーズに入ることなく、安定的に摩耗が進行していることが分かる。さらに、同図に示した切削距離

200 mの時点における工具断面観察結果からわかるように、通常のCBN工具を用いた場合、切削距離200 mの時点で工具刃先が約86 μm後退しているのに対し、開発工具を用いた場合の刃先後退量は約23 μm程度であり、刃先後退量を約1/3程度まで抑制することができている。

Inconel 718材の切削加工におけるCBN工具への期待は非常に高く、これまでもCBN工具の材料、形状、コーティングなど、様々な要素について盛んに研究が行われてきたものの、現場の要求を満足する性能が得られていないという状況は先述の通りである。そういった現状の中で、本研究の結果は、工具の“表面構造”というこれまで着目されてこなかった要素の工夫によって、CBN工具の飛躍的な性能向上が可能であることを示したと言える。

おわりに

本稿で紹介した航空宇宙系の難削材の切削加工に関する研究は、現在世界中で研究開発競争が激化している分野であると同時に⁶⁾、欧米と比較して我が国が圧倒的に不得意とする分野であることが度々指摘されており⁷⁾、当該分野における成果は極めて大きな波及効果を有している。こういった現状に対し、筆者らは本稿で紹介した工具開発に関する研究のみならず、加工方法や切削油剤など、難削材加工が抱える諸問題に対して多角的に研究に取り組んでいる。それと同時に、“難削材の加工”という極めて特殊かつ過酷な環境下における知見を獲得していくことで、切削加工現象そのものに対する深い理解をもたらしていきたいと考える所存である。

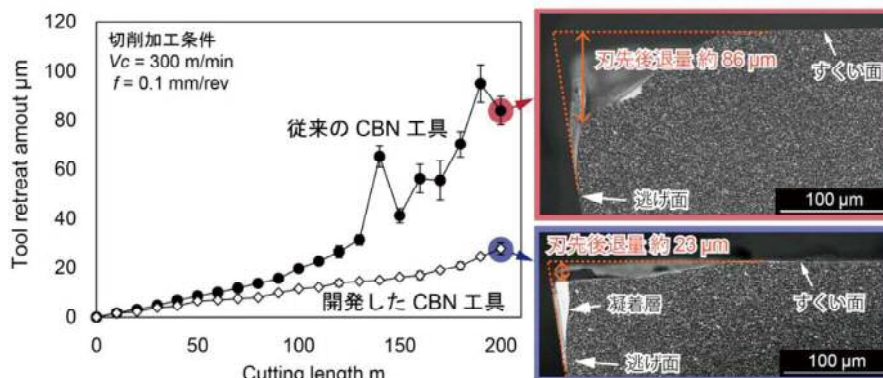


図5 開発工具の刃先後退量推移(左)と加工後の工具断面形状の比較(右)

参考文献

- 1) 中村裕道, 日本機械学会誌, 84, 748 (1981) 56-60.
- 2) D. Zhu, X. Zhang, H. Ding, Int. J. Mach. Tools Manuf., 64 (2013) 60-77.
- 3) T. Sugihara, Y. Nishimoto, T. Enomoto, Prec. Eng., 48 (2017) 75-82
- 4) T. Sugihara, T. Enomoto, Prec. Eng., 37 (2013) 888-896
- 5) T. Sugihara, T. Enomoto, Prec. Eng., 49 (2017) 52-60
- 6) 例えば (社) 日本政策金融公庫論集, 2011
- 7) 例えば (社) 日本機械工業連合会報告書, 2007

