研究論文

超耐熱合金の高速切削加工

相田　収平*　石川　淳**　田村　信*　須藤　貴裕*

High Speed Milling of Heat Resistant Super Alloy

AIDA Shuhei*，ISHIKAWA Atsushi**，TAMURA Makoto*and SUTOH Takahiro*

抄　録

インコネル 718 をはじめとした超耐熱合金は，高温下における優れた機械的特性から，航空機用ジェットエンジンや産業用ガスタービン部品などの材料に用いられている。しかしこれらの金属材料は，切削加工の観点からは加工硬化を生じやすいなど，金属材料の中でも代表的な難加工材料である。本研究では，超耐熱合金について，小径ボールエンドミルによる高速ミーリングを試みた。その結果，従来の切削速度を大きく上回る 60m/min～100m/min にて工具寿命の延伸効果を確認した。また，本加工技術によりブレード形状の加工を行い，びびりが発生しやすい薄肉加工においても，高能率で良好な加工面が得られたことから，超耐熱合金の新しい高能率切削加工方法として期待できる。

1.　緒　　言

インコネル 718 をはじめとした超耐熱合金は，高温下において，耐食性（耐酸化性，耐硫化性など）に富んでいることやクリープ強度が大きいことから，航空機用ジェットエンジンや産業用ガスタービンのブレード，ディスク，シャフトなど高温かつ高強度が求められる部位の材料として用いられている。

これらの金属材料は，その優れた機械的特性の反面，切削加工の観点からは加工硬化を生じやすいうえ，熱伝導率が鋼の約 1/4 と小さいため切削によって発生する熱が分散しにくいなど，金属材料の中でも代表的な難加工材料である。

今後，航空機産業や電力・エネルギー産業の発展に伴い，超耐熱合金の使用量が増えてくるなかで，効率的で環境に優しい切削加工技術が求められている。

新潟県工業技術総合研究所では，直径 2～10mm 程度の小径ボールエンドミルを高速回転，高速送り条件で使うことにより，これら難加工材料を高能率に切削する高速切削技術について研究を進めている [1) 2)]。今回，この高速切削を超耐熱合金に適用を試みた結果について報告する。

2.　実験概要

実験には図 1 に示す 5 軸立型マシニングセンタ（DMG 製 HSC55 Linear：主軸最高回転速度 28,000min^{-1}）を用いた。被削材は溶体化処理後に時効処理した Ni 基超耐熱合金インコネル 718（42HRC）である。実験には直径 6mm，TiAlN 系コーティングを施した市販の超硬ボールエンドミルを用い，図 2 に示す平面切削を行った。実験条件を表 1 に示す。

条件 1 と 2 は径方向切込量と 1 刃当たりの送り量が異なるが，切削速度が同一であれば，単位時間当たりの除去量がほぼ同じとなる加工条件である。各実験条件において切削速度と工具寿命の関係を評価した。また，条件 1 において切削速度が 100m/min のときの 1 刃当たりの送

*　研究開発センター
**　下越技術支援センター

図 1　5 軸マシニングセンタ

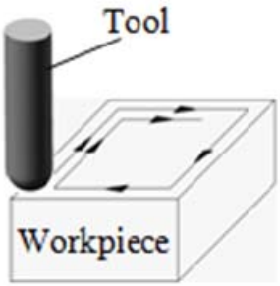

図 2　切削試験方法

り量と工具寿命の関係を評価した。評価は各実験条件において，工具寿命に至るまでの被削材の除去量および切削距離を比較した。なお，工具寿命の判定は工具逃げ面の最大摩耗幅が 0.2mm に達した時点とした。

3.　実験結果

3.1　切削速度の影響

図 3 に各実験条件における切削速度と工具寿命の関係を示す。インコネル 718 のエンドミル加工としては切削速度 20～30m/min が一般的といわれているが [3)]，条件 1 において，切削速度 20m/min では，除去量が 13.2cm^3 で工具寿命に達した。しかし，小径のボールエンドミルを高速回転させる本加工法では，切削速度を増加させるにつれ工具寿命が延長し，切削速度 60m/min で工具寿命が最大となり，除去量は 20m/min の約 4 倍に相当する 55.2cm^3 まで増加している。切削速度が 3 倍となっているため，加工効率も 3 倍となり，加工効率を高くするほど，工具寿命が長くなる結果が得られた。図 4 に切削速度 60m/min における実験終了後の工具写真を示す。工具先端から境界部において，ほぼ一様に摩耗している。

表 1　実験条件

	Condition 1	Condition 2
Cutting speed　(m/min)	20～120	15～130
Axial depth of cut　(mm)	0.3	0.3
Radial depth of cut　(mm)	0.5	0.8
Feed rate　(mm/tooth)	0.15	0.1
Work piece	Inconel 718 (42HRC)	
Tool	Carbide ball-nosed end mill	
	Diameter : 6 mm	
Cutting method	Down cutting	
Lubrication	MQL	
MQL supply	Lubricant quantity : 10ml/h	
	Air pressure : 0.5MPa	
Tool life criterion	Flank wear width = 0.2mm	

切削速度 60m/min を超える範囲では工具寿命が低下しているが，切削速度 120m/min においても 20m/min の約 1.8 倍の工具寿命が得られている。

条件 2 では，切削速度が 15m/min では，除去量が 16.8cm^3 で工具寿命に達した。切削速度が 15～45m/min の範囲では条件 1 と同様に切削速度を増加させるにつれ工具寿命が延長し，切削速度 45m/min で工具寿命が最大となり，除去量は 15m/min の約 3 倍に相当する 50.4cm^3 まで増加している。切削速度 45m/min を超える範囲では工具寿命が低下し，切削速度 100m/min において 15m/min とほぼ同等，130m/min では約 0.6 倍に工具寿命が低下した。

条件 1 と条件 2 を比較すると，切削速度が 45m/min 未満の低速領域では，条件 2 の方が工具寿命に至るまでにより多くの体積を除去できるが，切削速度が 45m/min 以上の高速領域，すなわち加工効率が高い領域では，切削速度が同じであれば条件 1 の方がより多くの体積を除去できる。条件 1 と 2 は切削速度が同じであれ

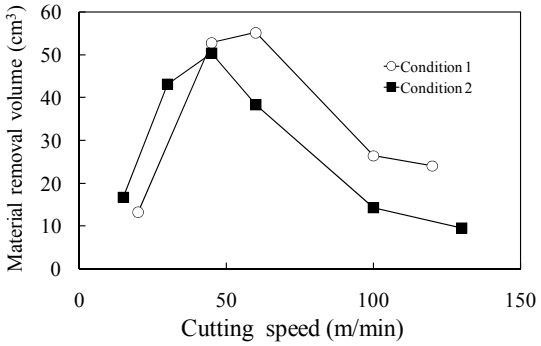

図 3　切削速度と工具寿命

図 4　切削加工後の工具刃部

ば，単位時間当たりの除去量はほぼ同じである。よって，切削速度が 45m/min 以上の高速領域では径方向の切込量を大きくするよりも 1 刃当たりの送り量を大きくとった方が，加工効率は同じであっても，1 本の工具でより多くの体積を除去できる。

3.2　1 刃当たりの送り量の影響

表 1 に掲げた条件 1 をもとに切削速度を 100m/min とし，1 刃当たりの送り量を 0.05～0.18mm/tooth まで変化させたときの工具寿命を図 5 に示す。1 刃当たりの送り量が 0.05mm/tooth において，切削距離が 81m で工具寿命に達した。また，1 刃当たりの送り量が 0.1mm/tooth では，0.05mm/tooth の約 2.4 倍に相当する切削距離 194m まで工具寿命が増加した。さらに 1 刃当たりの送り量を大きくした 0.1mm/tooth を超える範囲では工具寿命が若干

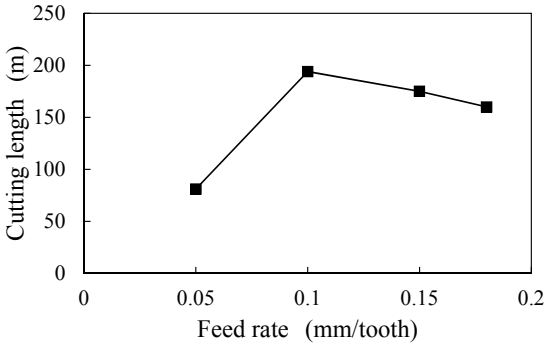

図 5　1 刃当たり送りと工具寿命

低下するが，0.15mm/tooth で切削距離 175m，0.18mm/tooth でも 160m の切削距離であり，極端な工具寿命の低下は見受けられない。この結果より，加工効率向上といった観点からは，チッピングなどを起こさない範囲で可能な限り 1 刃当たりの送り量を大きくすることが望ましいと考えられる。

4.　部品形状への適用

4.1　超耐熱合金製ブレード形状加工の試み

インコネル 718 などの超耐熱合金は，航空機用ジェットエンジンや産業用ガスタービンのディスク，シャフト，ブレードなど高温かつ高強度が求められる部位の材料として用いられている。航空機用ジェットエンジン部品は，高温での性能が求められるのは当然であるが，燃費向上などの目的から軽量化も要求されており，部品は必要最小限の肉厚で設計されている。そのためにブレードなどは翼厚が 1mm 程度と極端に薄肉であるため，切削加工する際にはびびりの抑制が重要な課題となる。びびりが発生すると，加工面の品位が著しく低下するのはもちろんであるが，工具刃先にチッピングを誘発することで工具寿命が著しく低下するなど様々な問題に波及する。

小径ボールエンドミルを用いる本加工法は，加工物に過大な負荷をかけることなく加工できることから，ブレードなどのような薄肉部品の加工に適していると考えられる。そこで，本加

工法を適用するアプリケーションの一つとして，航空機用ジェットエンジンのブレードを想定し，切削を試みた。

加工は 16mm×34mm×60mm のインコネル 718（42HRC）ブロック材からの削り出しで，翼の長さは 40mm，最も肉厚が薄い部分では 0.45mm の厚さとなる。使用した工具は前述同様の直径 6mm の超硬ボールエンドミルである。

加工順序は，まず最初にブレードとディスクの取り付け部であるダブテール（根部）を加工する。その後，ジグによりダブテール部を固定して翼面を加工した。ダブテール部の加工は荒加工，仕上げ加工ともに割り出し加工で行った。翼面の加工は，荒加工を割り出し加工，仕上げ加工を同時 4 軸制御加工で行った。翼面の加工では，荒加工時において翼面の表裏にそれぞれ 1.5mm の仕上げ加工代を残すことで，仕上げ加工時における被削材の剛性を確保するとともに，ブレード先端側から順次仕上げ加工を行うことでびびりを抑制した。その結果，加工後の表面粗さ Ra0.6μm と良好な加工面を得ることができた。図 6 に加工後のブレードを示す。なお，加工には荒加工，仕上げ加工にそれぞれ 1 本ずつ，計 2 本の工具のみを使用しただけであり，約 140 分で加工を完了した。

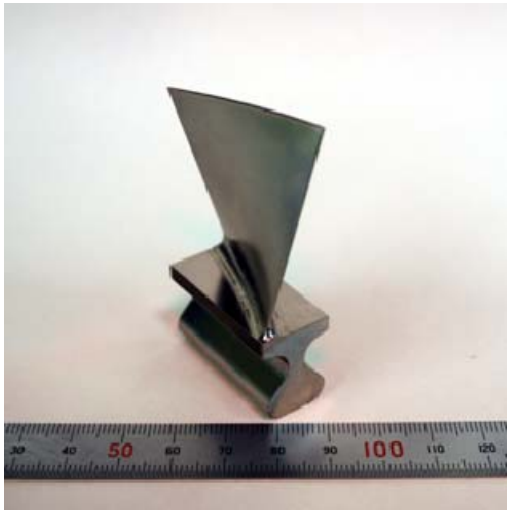

図 6　加工したブレードモデル

4.2　ドライ加工の試み

これまでは，微量の切削液を霧状にして吹き付けるセミドライ加工による切削加工技術について検討してきた。しかし，より環境に配慮した加工として，切削液を全く用いないドライ加工が望まれている。本研究では，超耐熱合金のドライ切削加工の可能性について，前述のブレード形状の加工を通じて検証した。

被削材は前述同様の 16mm×34mm×60mm のブロック材をインコネル 718 と杉を市販の接着剤で張り合わせて用意した。杉などの木材は高速切削が適しているうえ，切削液を用いると膨潤などを起こすためにドライ切削で行う必要がある。したがってインコネル 718 と杉を張り合わせた材料を切削する際も，ドライで切削加工をしなければならない。

加工中の様子を図 7 に示す。図中のノズルは切り屑を除去するためのエアーブロー用である。加工条件は被削材が異なることと切削液を用いないことを除けば，前述のインコネル 718 材ブレードと同様である。加工の結果，荒加工と仕上げ加工をそれぞれ 1 本の工具で完了しており，切削液を全く使用しないドライ加工が可能であることを確認した。

加工したブレードを「超耐熱合金と天然杉のコンポジットのブレード」と題して，切削加工ドリームコンテストに応募した。

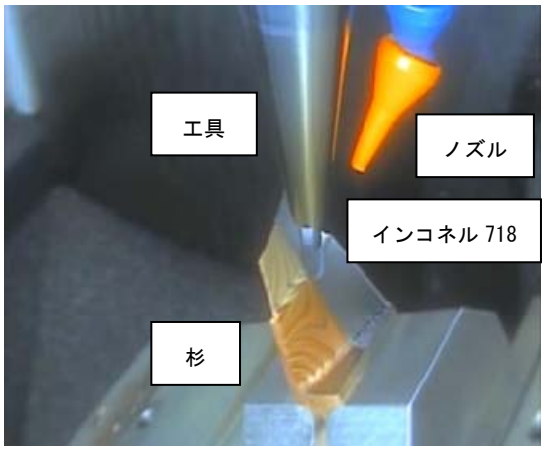

図 7　ドライ加工中の様子

切削加工ドリームコンテストとは，切削加工業界全体の技術・技能の交流と向上を主目的として，工作機械メーカーである(株)森精機製作所が主催するコンテストで，金型部門やアカデミック部門など 5 部門に分かれて審査される。2004 年に第 1 回目のコンテストが開催されて以来，毎年開催されており，第 7 回目の開催となった 2010 年は大阪大学の竹内芳美教授を審査委員長とする 5 名の大学教授により審査された。今回の応募総数は 105 作品であり，応募した作品は JIMTOF2010 にて展示された。審査の結果，インコネルと天然杉という異素材を同じ加工条件で薄板のブレード形状にドライ加工した技術の高さが評価され，アカデミック部門で最高賞である金賞を受賞することができた。図 8 に JIMTOF2010 で展示された様子を示す。

図 8　JIMTOF2010 での受賞展示

5.　結　　言

超耐熱合金インコネル 718 の小径ボールエンドミルによる高速ミーリングを試み，以下の結果を得た。

（1）　条件 1，2 とも，ある切削速度までは切削速度の増加に伴い工具寿命が延長し，加工効率を高くするほど工具寿命が延長する領域が存在する。

（2）1 刃当たりの送り量は 0.1mm/tooth で最も工具寿命が長くなったが，加工効率を考慮すると，チッピングなどを起こさない範囲で可能な限り大きくすることが望ましいと考えられる。

（3）小径のボールエンドミルを用いた高速回転，高速送り加工では，びびりが発生しやすい薄肉加工においても適切な条件を与えることで，高効率で良好な加工面を得る加工が可能である。

（4）超耐熱合金の高速ドライ切削により加工したブレードが，切削加工ドリームコンテストにて最高賞である金賞を受賞した。

参考文献

1）嶽岡悦雄，相田収平，石川淳，須藤貴裕，“小径ボールエンドミルによるチタン合金の高速ミーリング”，2009 年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料集，p11-14.

2）　嶽岡悦雄，相田収平，石川淳，須藤貴裕，“小径ボールエンドミルによるチタン合金の高速切削加工”，チタン，Vol.58，No.3，2010，p226-230.

3）例えば，狩野勝吉著，“難削材・新素材の切削加工ハンドブック”，工業調査会，2002，p252.