

研究論文

コーティングセラミック工具を用いたインコネル 718 の加工

河田圭一*1、石川和昌*1、児玉英也*1、島津達哉*1

Turning of Inconel 718 with Coated Ceramic Tool

Keiichi KAWATA*1, Kazumasa ISHIKAWA*1,
Hideya KODAMA*1 and Tatsuya SHIMAZU*1

Industrial Research Center*1

航空機部品の材料であるインコネル 718 は難削材として知られ、工具の長寿命化や加工能率の向上が求められている。本研究では、窒化ケイ素系セラミック表面に Al_2O_3 と TiN を被覆した工具を用いたロータリ切削を実施した。その結果、コーティング工具を使用することにより欠けの発生が抑えられることが分かった。また、ロータリ切削の方が一般的なシングルポイントによる旋削より残留応力が低い仕上げ面を得られることが分かった。最後に開発技術を用いてタービンディスクモデルの試作を行った。

1. はじめに

航空機エンジン部品の材料として使用されるインコネル 718 などのニッケル基耐熱合金は、難削材として知られている。近年、航空機産業においても生産性の向上が厳しく求められており、工具の長寿命化や加工能率の向上が要望されている。そこで、これらの課題を解決するため、本研究ではこれまでロータリ切削工具による旋削加工を実施し、窒化ケイ素系セラミック工具を用いた加工能率の向上や長寿命化の可能性について検討してきた¹⁾。その結果、ソリュブル系水溶性切削液を使用することや、すくい角を大きくすることにより工具摩耗が抑えられることを示してきた。本年度は、窒化ケイ素系セラミック表面に Al_2O_3 と TiN を被覆した工具を使用することにより、欠けの発生を抑えることを試みるとともに、仕上げ面性状について調べた。さらに、開発工具や加工技術の実用性について評価するためタービンディスクモデルの試作を行った。

2. 実験方法

2.1 工具逃げ面摩耗の評価

実験は、複合加工機（オークマ㈱、MULTUS B300）を使用し、**図 1** に示すような外径旋削を行った。本実験で使用した工具形状には逃げ角を設けていないので、図のように加工点を 15° 上方にオフセットすることにより逃げ角を設定した。このため、実質すくい角は約 -12° となる。加工条件を**表 1** に示す。被削材には時効処理を施したインコネル 718 を使用した。工具材種には、窒化ケイ素系セラミックである SX9 および同材質

のセラミック表面に Al_2O_3 と TiN を被覆した SP9 を使用した。切削油剤にはソリュブル系水溶性切削液を使用し、工具を保持しているコレットから吐出した。

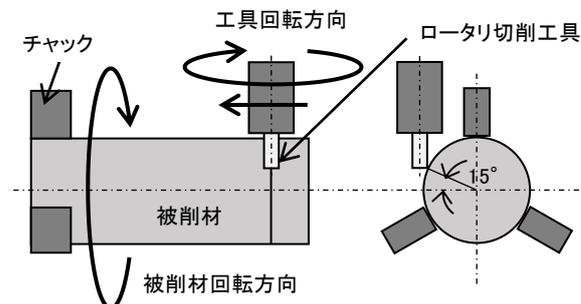


図 1 工具摩耗試験の加工模式図

表 1 工具摩耗試験の加工条件

被削材	インコネル 718(HRC45)
工具	材種: SX9, SP9(日本特殊陶業(株)) 形状: $\phi 10\text{mm}$ 円筒 すくい角: 3° 逃げ角: 0°
切削速度	300m/min
切込み	0.5mm
送り	0.4mm/rev
工具周速	5m/min
切削油剤	ソリュブル系水溶性(希釈濃度 6.5%)

2.2 仕上げ面性状の評価

航空機エンジンのタービンディスクや燃焼器などの実製品において、仕上げ面性状は疲労強度などの機械的性質に大きく影響するため、切削による加工変質層や仕上げ面粗さは小さいことが望まれる。そこで、疲労強度に影響する残留応力および仕上げ面粗さの測定を行った。

*1 産業技術センター 自動車・機械技術室

2.2.1 残留応力の測定

残留応力の測定には、X線応力測定装置（柵リガク、AutoMATE II）を使用した。測定条件を表2に示す。R形状などの試験片形状が測定値に影響するため、円筒面ではなく円筒端面（直径 90mm、厚さ約 30mm）を旋削により仕上げた面を試験片として供した。残留応力測定用試験片の加工条件を表3に示す。工具は摩耗試験と同形状のものを使用し、材種は SP9 とした。試験片は、工具を回転して加工した場合と回転を固定して加工した場合の 2 種類を用意した。回転を固定した場合は一般的なシングルポイントによる旋削と同等である。試験片の製作時に工具ホルダが干渉しないように工具は 20° 傾けて加工したため、実質のすくい角は約 17° の負角とした。加工機の都合上、試験片の回転数は一定とした。このため試験片の半径位置により切削速度は異なり、切削速度が 50、100、200、300m/min となる位置の残留応力を測定し、切削速度の影響について調べた。

表2 残留応力測定条件

管球	Cr
ターゲット	Cr-K α
管電圧	30kV
管電流	20mA
測定方法	並傾法
回折角	129°
コリメータ	ϕ 4mm
ψ 角 ($\phi=0^\circ$)	0, 18, 27, 33, 39, 45
X線照射時間	30s/ ψ
X線応力定数	-645MPa/deg
解析方法	半価幅中点法

表3 残留応力測定用試験片の加工条件

回転数	1194min ⁻¹ (約 50~300m/min)
切込み	0.3mm
送り	0.4mm/rev
工具周速	5m/min
切削油剤	ソリュブル系水溶性

2.2.2 仕上げ面粗さの測定

仕上げ面粗さの測定は、非接触三次元粗さ計（ブルカー、Wyko NT9100）を用いて行った。測定箇所は、残留応力測定と同じ場所を測定した。

2.3 タービンディスクモデルの加工

本研究における開発技術のターゲットとしたタービンディスクおよび燃焼器への加工技術の実用性を検討するため、 ϕ 200mm のタービンディスクモデルの試作を行った。加工機には複合機加工機（オークマ柵、MULTUS U3000）を使用した。加工の様子を図2に示

す。加工条件は、切削速度 174~425m/min、切り込み 0.5mm、送り 0.2mm/rev とした。工具材種は SP9 を使用し、工具形状は同一のものを使用した。切削油剤はソリュブル系水溶性を使用した。

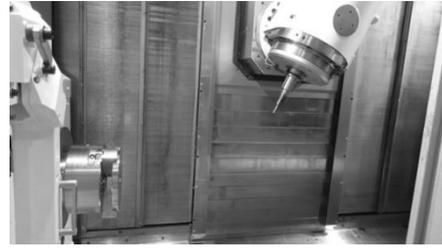


図2 タービンディスクモデルの加工試験の様子

3. 実験結果及び考察

3.1 工具逃げ面摩耗

工具材種 SX9 および SP9 について切削距離に対する逃げ面摩耗幅の変化を測定した結果を図3に示す。それぞれの工具材種において逃げ面摩耗幅に大きな違いは見られなかった。このことから、SP9 に施したコーティング層による摩耗の低減効果は得られないことが分かった。しかし、約 350m まで切削が終了した SX9 の工具を観察すると、図4に示すような工具に比較的大きな欠損が見られた。このため、この時点で工具寿命と判断した。一方、SP9 ではこのような欠損は生じず、本実験で工具寿命と判断した逃げ面摩耗幅 100 μ m に達した約 790m まで加工することができた。SX9 に比べ約 2 倍の切削距離の加工が可能であった。

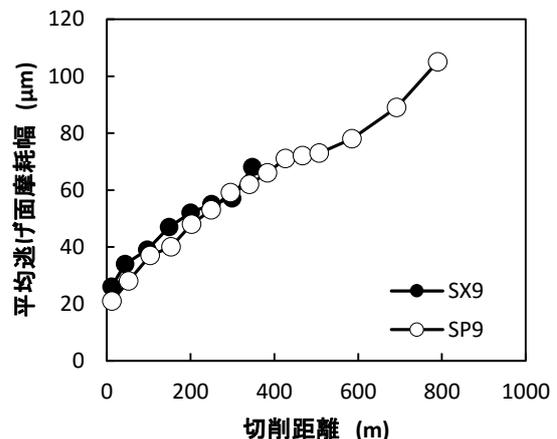
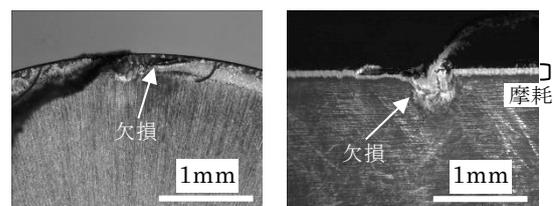


図3 逃げ面摩耗幅の変化



(a)すくい面 (b)逃げ面

図4 350m 切削後の工具 (SX9) の様子

切削距離が約 300m 時のそれぞれの逃げ面を観察した結果を図 5 に示す。逃げ面にできた摩耗の境界部に注目すると、SX9 では変化が大きいのに対し、SP9 では小さいことが分かる。同様な現象は加工初期から見られた。工具素材がセラミックのため、SX9 ではチップングが多く発生し境界部が荒れた一方、SP9 では組成の異なるコーティング層の存在によりチップングが抑えられたのではないかと考えられる。このため、SP9 では突発的な欠損にまで至る大きな欠けが発生することなく、安定した定常な摩耗が進行し、工具寿命を延ばすことが可能であったと考えられる。

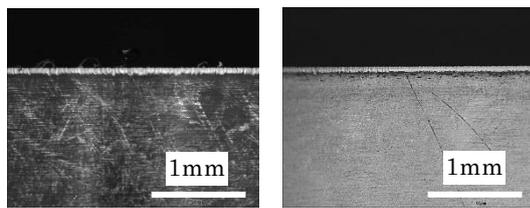


図 5 逃げ面摩耗の様子 (切削距離約 300m)

3.2 仕上げ面性状の評価

3.2.1 残留応力

図 6 に残留応力測定結果を示す。プラス側は引張、マイナス側は圧縮の残留応力を示す。加工方法によらず残留応力は異方性を示し、切削方向に比べ送り方向の方が残留応力は引張側に大きい値を示した。また、切削速度 200m/min までは切削速度が速くなるにつれ残留応力は大きくなる傾向を示したが、一部を除き切削速度 300m/min で若干下がる傾向を示した。

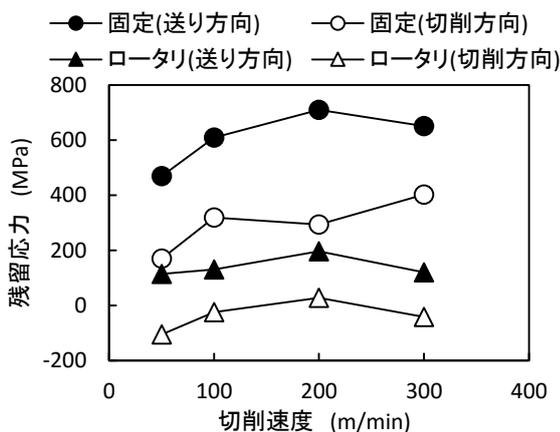
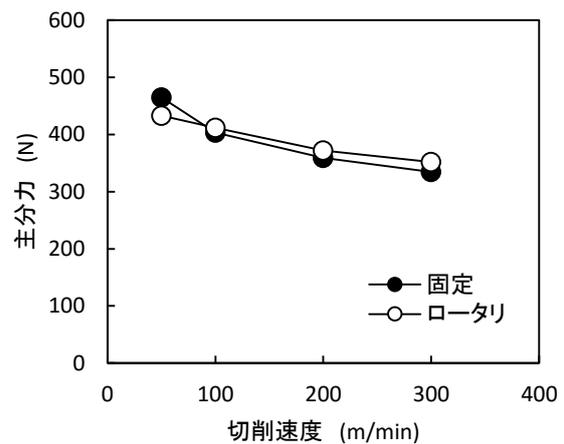


図 6 残留応力測定結果

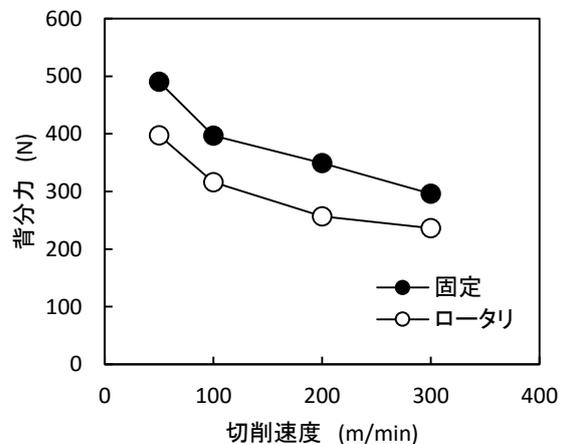
工具回転を固定した場合と工具を回転したロータリ切削の場合を比較すると、どの条件においてもロータリ切削の方が残留応力は小さい値となった。このことから、

ロータリ切削の方が加工歪の小さい加工が可能であり、引張応力の影響も小さいため疲労強度に有利な仕上げ面を創製できることが分かった。

残留応力に影響を与える切削抵抗を測定した結果を図 7 に示す。主分力ではどちらの方法でもほぼ同じ値を示しており、加工方法による違いは見られなかった。一方、背分力はどの切削速度においてもロータリ切削の方が工具を固定した切削に比べ小さい値を示した。このことが、ロータリ切削の方が残留応力を小さくできた要因の一つと考えられる。



(a)主分力



(b)背分力

図 7 切削抵抗の測定結果

3.2.2 仕上げ面粗さ

算術平均粗さ Ra を測定した結果を図 8 に示す。切削速度の違い 100m/min 以下ではどちらの加工方法においてもほぼ同程度の仕上げ面粗さが得られた。しかし、切削速度が速くなるとロータリ切削の方が仕上げ面粗さは小さくなる傾向を示した。そこで、光学顕微鏡により切削速度 300m/min の仕上げ面を観察した。観察結果を図 9 に示す。工具回転を固定した加工では、図中の

矢印で示すような凝着物が多く観察された。切削速度が速くなり切削点温度が上昇したため、刃先で生成された凝着物が仕上げ面に移着しやすくなったと考えられる。一方、ロータリ切削では工具が回転していることにより背分力が小さくなり温度上昇が抑えられたことにより凝着が抑えられたのではないかと推測される。今後、切削温度を測定し検証が必要である。

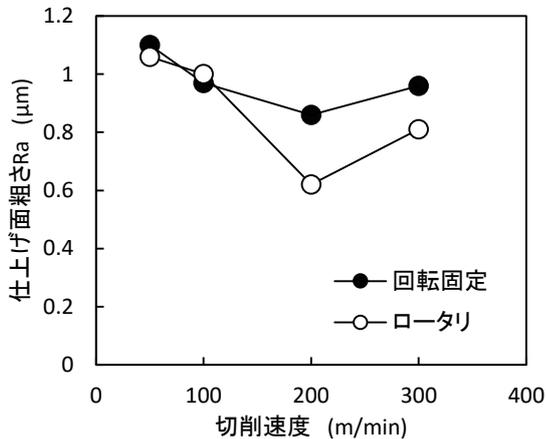
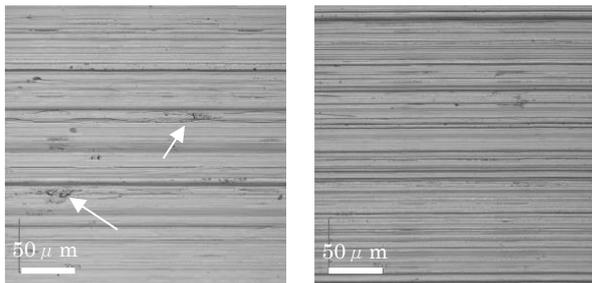


図8 仕上げ面粗さの測定結果



(a)固定 (b)ロータリ

図9 光学顕微鏡による仕上げ面観察結果

3.3 タービンディスクモデルの加工

本研究で開発した工具および加工技術を用いて試作したタービンディスクモデルの外観を図10に示す。図中の矢印部分を加工した。同部に加工されている貫通穴はロータリ切削後に加工した。加工部は約5mm程度掘り下げられており、被削材と工具が干渉しないよう焼き締めホルダにより工具を保持することで、工具の突き出しを抑え、工具剛性を高くできるようにした。その結果、仕上げ面粗さは $0.89 \mu\text{mRa}$ となり実験で得られた結果と同等の仕上げ面粗さが得られた。このことから、実製品に近い形状でも加工ができる可能性を示すことができた。しかしながら、図11に示すように、仕上げ面には若干のうねりが生じた。工具を保持した時の振れが $30 \mu\text{m}$ 生じたことが原因と考えられる。これまでの

実験では工具の振れは数 μm 程度まで抑えられることを確認しているため、工具の真円度を改善することにより仕上げ面粗さを向上することが可能と考える。



図10 試作したタービンディスクモデル

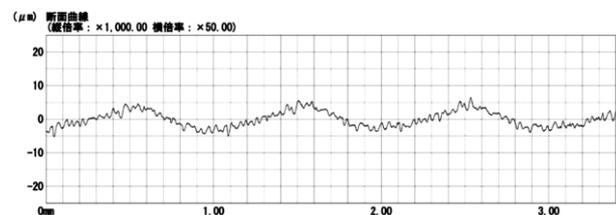


図11 タービンディスクの仕上げ面粗さ

4. 結び

- (1)窒化ケイ素系セラミックに Al_2O_3 とTiNを被覆した工具を用いることによりチッピングが抑えられ摩耗が安定し、工具寿命が延びることが分かった。
- (2)ロータリ切削の方がシングルポイントによる旋削より仕上げ面の残留応力は小さくなり、加工歪が小さいことが分かった。
- (3)本研究で開発した工具および開発技術を用いてロータリタービンディスクモデルを試作した。

謝辞

工具材料を提供していただいた日本特殊陶業株式会社に記して謝意を表す。

付記

本研究は、平成27年度「知の拠点あいち」重点研究プロジェクト「低環境負荷型次世代ナノ・マイクロ加工技術の開発」において実施した研究成果の一部である。

文献

- 1) 河田, 児玉, 石川: あいち産業科学技術総合センター研究報告, 4, 46(2015)