

技術資料



Technical Data

超耐熱合金の高効率切削加工

杉野 敦*, 八田 武士*

High Efficiency Cutting of Super Heat Resistant Alloy

Atsushi Sugino and Takeshi Hatta

Synopsis

Super heat resistant alloys such as Inconel 718, used in gas turbine disks, aircraft components etc. are known as difficult-to-machine materials because of high strength at elevated temperature and low thermal conductivity. The purpose of this study is to verify the effect of high-pressure coolant in rough turning of Inconel 718.

Obtained results are as follows.

1. In rough turning of Inconel 718, tool life and chips rejectability were improved with the increase of the coolant pressure from 0.1 to 7.0 MPa.
2. 7.0 MPa of high pressure coolant makes the machining efficiency twice. Furthermore, It improves the chip removal volume 1.6 times.
3. 7.0 MPa of high pressure coolant can decrease the cutting temperature by 70 °C .

1. 緒 言

近年、地球環境維持の観点から発電業界、航空機産業など、熱効率の向上によるエネルギーの効率的な活用が重要な課題となっている。熱効率の向上には燃焼温度の高温化が不可欠であるため、高温下で優れた機械的特性と化学的特性を持つ材料の適用が進んでいる¹⁾。

超耐熱合金は高温下での強度と化学的安定性が高いため、熱効率の向上を目的としてガスタービンディスクや航空機部品などに多く使用されている^{2),3)}。しかし、部材として優れている反面、切削加工においては高温下の強度の高さと熱伝導率の低さによって被削材と工具との接触面温度（以降、切削温度と呼ぶ）が上昇し易い。そのため、炭素鋼などに比べて切削能率が非常に低く、製造コスト増加の一因となっている。このように、高い難削性を有する超耐熱合金の切削能率向上に対する取組の一つとして高圧クーラントが報告されている^{4),5)}。

高圧クーラントの特徴は、被削材から発生した切くずと工具刃先との間にクーラント液を高圧で正確に供給することであり、¹⁾ 工具刃先の冷却効果、²⁾ 高圧クーラント流で切くずを工具刃先から離すことによる摩擦発熱抑制効果、³⁾ 高圧クーラント流による切くず破砕性効果が期待される⁵⁾。これらの効果は、切込深さが小さい仕上げ旋削加工においては確認されており^{4),5)}、工具寿命の改善や加工能率の向上に活用されている。

しかし、ガスタービンディスクや航空機部品などの切削加工では、切込深さが大きい中・粗旋削加工が長い加工時間を占めている。切込深さが大きくなると切くずのサイズも大きくなるため、仕上加工に比べて切くずの曲げ強度が高くなる。そのため、高圧クーラントによる摩擦発熱抑制効果や切くず破砕性効果の低下が懸念され、仕上げ旋削加工と同様の効果が得られるか不明である。そこで、本報告では超耐熱合金 Inconel 718 の中・粗旋削加工における高圧クーラントの切削能率の向上効果と切くず破砕性を評価した。

2011年11月14日受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

2. 実験方法

2. 1 実験装置

森精機製作所製5軸複合加工機 NT4200DCG を用いて丸棒の外周を旋削加工した。切削工具には超耐熱合金の旋削加工用超硬 PVD コーティング材種の菱形ネガティブチップを使用し、クーラント液には10倍希釈のエマルジョンを使用した。

クーラント液は高圧ポンプ装置（最大圧力 7.0 MPa, 最大流量 25 L/min）からスルスピンデル方式で供給し、Fig.1 に示す高圧クーラント専用治具に設けられた内径 $\phi 1$ mm のクーラントノズルから工具すくい面側の刃先へ注液した。

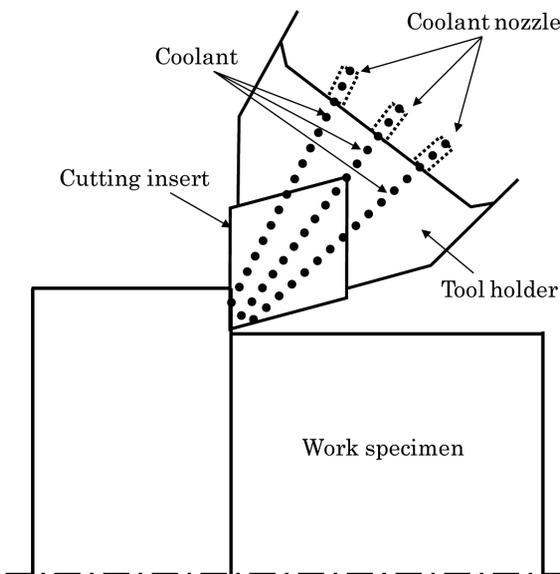


Fig.1. Schematic view of the coolant injection.

2. 2 実験条件

Table 1 に実験条件を示す。超耐熱合金 Inconel 718 の中・粗旋削加工における高圧クーラントの切削能率向上効果を検証するため、切込み量は片側 2 mm, 送り速度は 0.25 mm/rev とし、切削速度は一般的な加工条件である 25 m/min と、加工能率を高めた 50 m/min で加工を行った。クーラント圧力は 0.1 MPa（低圧）と圧力を高めた 7.0 MPa（高圧）でそれぞれ加工を行った。工具損傷の程度は、切削工具の逃げ面摩耗幅が 500 μ m に達するまでの時間を「工具寿命」、工具寿命までに被削材から削り取る切くず体積を「切くず排出量」として評価した。また、切削工具の逃げ面摩耗幅は実体顕微鏡により測定した。

Table 1. Experimental conditions in turning of Inconel 718

Work specimen	
Materials	Inconel 718
Hardness	HB415
Cutting insert*	
	CNMG
Tool geometry	
Orthogonal rake angle	-6°
Cutting edge inclination	-6°
Orthogonal clearance angle	6°
Side cutting edge angle	-5°
Entering angle	50°
Nose radius	0.8 mm
Process parameters	
Cutting velocity	25 m/min, 50 m/min
Feed rate	0.25 mm/rev
Depth of cut	2 mm
Coolant	
Type of coolant	Emulsion
Coolant pressure	0.1 MPa, 7 MPa

*Based on JIS-B4120-1998

3. 実験結果

3. 1 工具寿命に及ぼすクーラント圧力の影響

Fig.2 に Inconel 718 を切削速度 50 m/min で旋削加工した際のクーラント圧力と工具寿命の関係を示す。クーラント圧力 0.1 MPa（低圧）では 3.3 min であった工具寿命が 7.0 MPa（高圧）へ高圧化することで 3.9 倍の 12.8 min まで改善された。このことから、Inconel 718 の中・粗旋削加工においても、クーラント圧力の高圧化が工具寿命改善に有効であることが確認された。

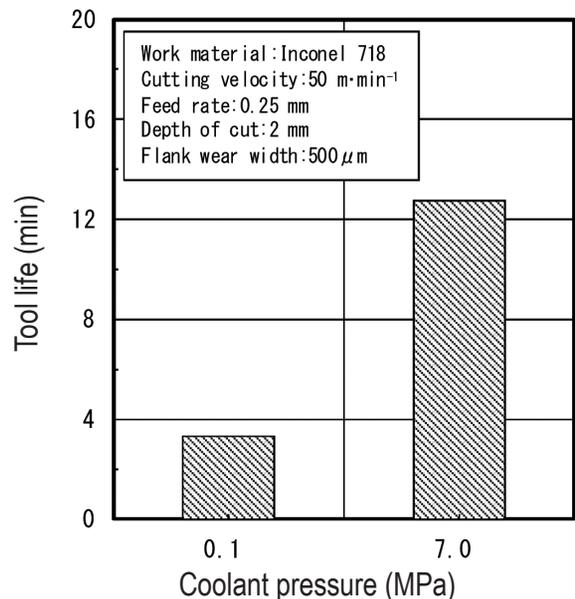


Fig.2. Comparison of the tool life in turning of Inconel 718 by CNMG insert under different coolant pressure.

次に、低圧クーラントによる一般的な加工条件（切削速度 25 m/min）に対して、高圧クーラントを用いた高能率加工条件（切削速度 50 m/min）で Inconel 718 の旋削加工を行い、その際の切くず排出量の比較を行った。Fig.3 にそれぞれの切くず排出量を示す。

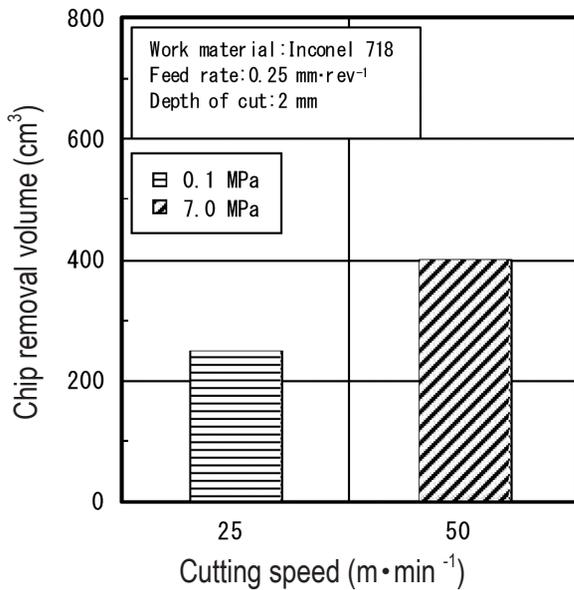


Fig.3. Comparison of the chip removal volume in turning of Inconel 718 by CNMG insert under different cutting speed and coolant pressure.

低圧クーラント条件（切削速度 25 m/min）での切くず排出量 250 cm³ に対して、高圧クーラント条件（切削速度 50 m/min）では切くず排出量は 400 cm³ であった。

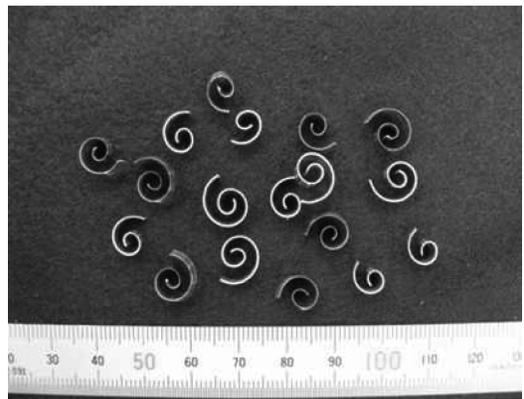
切削速度を 2 倍にすることで切削能率を 2 倍に高めた場合においても、高圧クーラントを適用することで切くず排出量が低圧クーラント対比で約 1.6 倍まで改善されており、Inconel 718 の中・粗旋削加工において高圧クーラントが切削能率向上に有効であることが確認された。

3. 2 切くず破碎性に及ぼすクーラント圧力の影響

Fig.4 に Inconel 718 を切削速度 50 m/min にて、低圧および高圧クーラントで旋削加工した際の切くず形状を示す。クーラント圧力を 0.1 MPa から 7.0 MPa へ高圧化することで、切くずのカール径が小さく、細かく破碎された切くずが形成された。このことから、Inconel 718 の中・粗旋削加工においてもクーラント圧力の高圧化が切くず破碎性の改善に有効であることが確認された。



(a) 0.1 MPa coolant pressure



(b) 7.0 MPa coolant pressure

Fig.4. Comparison of the chip geometry in turning of Inconel 718 by CNMG insert under coolant pressure (a) 0.1 MPa and (b) 7.0 MPa.

4. 考 察

一般に超硬切削工具を用いて行う旋削加工では、被削材と工具との切削温度が 800 °C を超えると工具摩耗形態は拡散摩耗が支配的になり、切削温度の上昇とともに指数的に工具摩耗が進行することが知られている^{6)~10)}。Inconel 718 の仕上げ旋削加工では、一般的な低圧クーラントを用いると切削速度 50 m/min で切削温度は約 900 °C まで上昇しており⁴⁾、急激な拡散摩耗が進行する条件に達している。そこで Inconel 718 の仕上げ旋削加工においては、高圧クーラントによる切削温度の抑制を行っており⁴⁾、中・粗旋削加工においても同様に、切削温度抑制により工具摩耗が抑制されたと考えられる。

そこで、中・粗旋削加工における高圧クーラントの工具刃先冷却効果を確認するため、被削材-工具熱電対法¹¹⁾を用いて旋削加工時の切削温度の測定を行った。

Inconel 718 の中・粗旋削加工では切込み深さが大きい
ために仕上旋削加工よりも切削温度が高くなる。その
ため、温度測定をしている最中でも工具刃先の摩耗進
行が早く切削温度が変動し、定常状態における切削温
度の評価が困難であった。

そこで、高温状態の工具摩耗進行を抑制し、切削温
度 800 °C 以上においても安定的に切削温度を評価する
ため、高温強度の低い S45C を被削材として用いて、切
削温度の測定を行った。Table 2 に実験条件を示す。切
削条件は Inconel 718 の旋削加工で想定される切削温
度 900 °C 程度の切削温度を再現できるように選定した。
クーラント条件は 0.1 MPa (低圧)、7.0 MPa (高圧) と
変化させ、切削温度に及ぼすクーラント条件の影響を
調査した。

Table 2. Experimental conditions for turning of S45C

Work specimen	
Materials	S45C
Hardness	HB200
Cutting insert*	
CNMG	
Tool geometry	
Orthogonal rake angle	-6°
Cutting edge inclination	-6°
Orthogonal clearance angle	6°
Side cutting edge angle	-5°
Entering angle	50°
Nose radius	0.8 mm
Process parameters	
Cutting velocity	100,200 and 300 m/min
Feed rate	0.25 mm/rev
Depth of cut	2 mm
Coolant	
Type of coolant	Emulsion
Coolant pressure	0.1 MPa, 7 MPa

*Based on JIS-B4120-1998

Fig.5 にクーラント条件と切削温度の関係を示す。切
削温度は切削速度に対してほぼ線形的に増加し、この
傾向はクーラント圧力によらず同じであった。切削温
度 600 °C から 900 °C 程度の範囲では、クーラント圧力
を 0.1 MPa (低圧) から 7.0 MPa (高圧) に高圧化させ
ることで、54 °C から 68 °C の工具刃先冷却効果が得られ
ることがわかった。

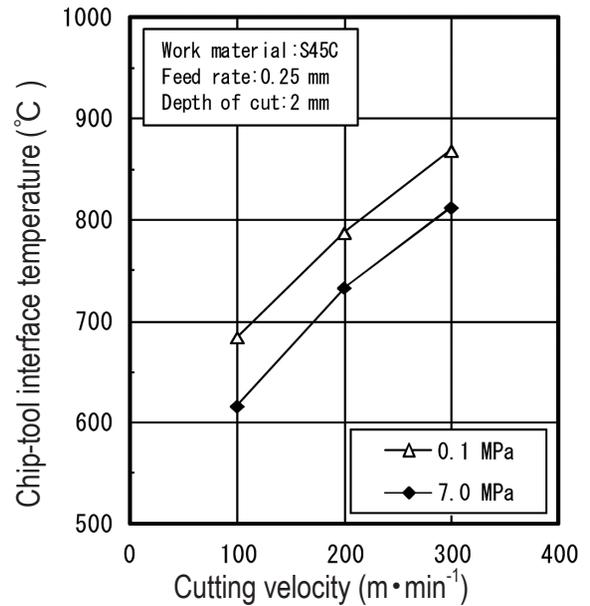


Fig.5. Variation in temperature with cutting velocity and coolant condition in turning of S45C by CNMG insert.

Fig.6 にクーラント圧力と切削温度の関係を示す。クー
ラント圧力を 0.1 MPa から 7.0 MPa に高圧化した際の切
削温度の変化は切削速度によらずほぼ一定であった。こ
のため、同程度の切削温度域と推定される Inconel 718
の中・粗旋削加工においても、高圧クーラントを適用
することによって 50 ~ 70 °C 程度の工具刃先冷却効果
が得られると考えられる。

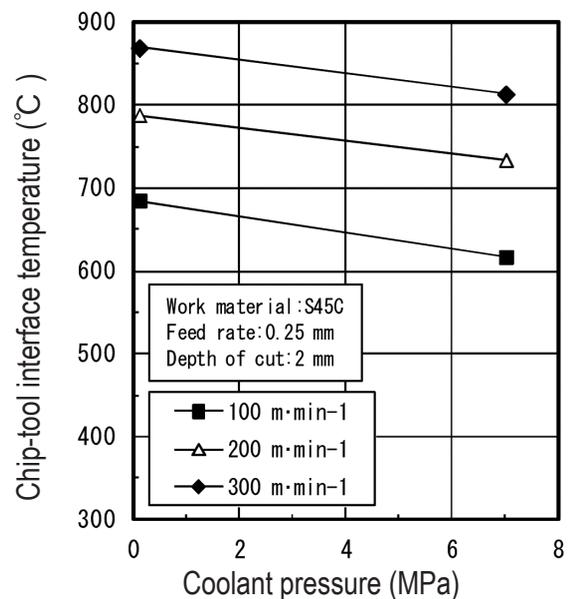


Fig.6. Variation in temperature with coolant pressure and cutting velocity in turning of S45C by CNMG insert.

5. まとめ

超耐熱合金の高効率切削化を目的として、Inconel 718 の中・粗旋削加工における、高圧クーラントの切削能率・工具寿命の向上効果と切くず破砕性改善効果を検証する旋削実験を行い以下の結果を得た。

- 1) 中・粗旋削加工において、クーラント圧力を 0.1 MPa から 7.0 MPa に高圧化することで、工具の長寿命化と切くず破砕性の改善がはかられた。
- 2) 一般的な加工条件に対し、高圧クーラントを適用することで、切削能率を 2 倍に上昇させても、切くず排出量が 1.6 倍まで改善できた。
- 3) 中・粗旋削加工において、クーラント圧力を 0.1 MPa から 7.0 MPa に高圧化することで約 70 °C の工具刃先冷却効果が期待でき、拡散摩耗の抑制に有効であると考えられる。

(文 献)

- 1) 木村宰，加治木紳哉：電力中央研究所報告，Y07009(2008) ，2.
- 2) 塚越敬三，六山亮昌，正田淳一郎，岩崎洋一，伊藤栄作：三菱重工技報，44 (2007) ，4，2.
- 3) R.Couturier， C.Escaravage：High temperature alloys for the HTGR Gas Turbine,1.
- 4) 猪谷彦太郎，黒田基文，江川庸夫，竹内政人，板倉勝利：三菱重工技報，35 (1998) ，2，148.
- 5) E.O.Ezugwu：ABCM., 116 (2004) ，1，1
- 6) 北川武揚，白樫高洋，白井英治：精密機械，42 (1976) ，12，92.
- 7) 北川武揚，白樫高洋，白井英治：精密機械，43 (1977) ，10，87.
- 8) 白井英治，北川武揚，前川克廣，帯川利之，白樫高洋：精密機械，48 (1982) ，9，97.
- 9) 北川武揚，前川克廣，白樫高洋，白井英治：精密工学会誌，53 (1987) ，9，78.
- 10) 前川克廣，北川武揚，白樫高洋，白井英治：精密工学会誌，54 (1988) ，2，102.
- 11) 中山一雄：切削加工論，コロナ社，1993,64.