

Ni 基合金におけるウルトラファインバブル・高圧クーラント のドリル刃先温度への影響評価

森本和邦*

Influence of Ultra Fine Bubble and High Pressure Coolant
on the Temperature of the Edge of Drill in Ni-Based-Alloy

Kazukuni MORIMOTO

To investigate the cooling effect on drill cutting edges during drilling Ni-based alloys, the temperature of drill cutting edges was measured by thermocouples while coolant was supplied by a combination of Ultra Fine Bubbles (referred to as UFB) and high-pressure coolant with an internal lubrication system. Since the measured point of drill bit tip temperature is located 2 mm away from the drill tip, the drill tip temperature cannot be measured directly. Therefore, a simple test using a hot plate was carried out to make a calibration curve for estimating the drill tip temperature. The experimental results showed that the coolant mixed with UFB supplied at standard pressure deteriorated the cooling performance compared to that without UFB supplied at standard pressure. This may be attributed to the fact that UFB changes into Micro Bubbles (referred to as MB) when cutting oil is supplied. On the other hand, the drill tip temperature was about 34 % lower when high-pressure coolant without UFB was supplied than when standard pressure coolant without UFB was supplied. In particular, with UFB-coolant mixture at high-pressures, the drill tip temperature was reduced by about 20 %. These results suggests that the use of high-pressure coolant, with/without UFB, improves the cooling performance of the drill tip.

Keywords: Ni-Base Alloys, Ultra Fine Bubbles, High Pressure Coolant, Drilling, thermocouple method

1. はじめに

Ni 基合金は、高温での耐熱性や耐食性が高く、発電所のガスタービンや航空機エンジン部品、ロケット部品に使用され、複雑形状や少ロット品においては主に切削で加工される。Ni 基合金は、熱伝導率が低く、切削加工では工具刃先に熱が籠りやすく、溶着や熱拡散摩耗による工具摩耗が大きいといった難削性が知られている。Ni 基合金の切削加工における切削油剤の影響を調べた先行研究では、各種切削油の Ni 基合金への適用の検討¹⁻³⁾が行われており、工具刃先の冷却性の重要性が示されている。特に高圧クーラントを旋削加工に使用した際に旋削チップ温

度が顕著に低下した報告⁴⁾がなされており、高圧クーラントによる冷却効果は高いと考えられる。また高圧クーラントの動向を調べた報告⁵⁾では、高圧クーラントが経済的に有効なアプローチとなる1つとして、ドリルでの深穴加工を挙げている。高硬度鋼のドリル加工において高圧クーラントを適用し工具寿命改善や刃先温度が低下した報告⁶⁾がなされているが、Ni 基合金のドリル加工時の刃先温度を測定した報告はなされていない。

そこで、本研究では、Ni 基合金のドリル加工において、センタースルーにより 7 MPa の高圧クーラントを適用し、ドリル内部に熱電対を挿入する熱電対法、及び無線送信機能付きツールホルダによりドリル刃先温度の測定を行った。また本研究では、

* プロジェクト研究課

切削油剤にウルトラファインバブル（以下、UFBとする）を入れたものに高圧クーラントを適用した際の刃先温度を調べるため、バブルとして空気を入れたUFBの適用も検討した。

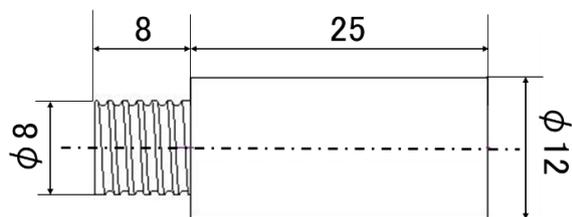


図1 供試材の形状

表1 高耐食性ハステロイ (MAT21) の化学成分 [%]

alloy	Ni	Cr	Mo	Fe	Ta	others
MAT21	Bal	19	19	1 max	1.8	LowC, LowSi

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材として、Ni 合金の高耐食性ハステロイ（株式会社プロテリアル製 MAT21⁷⁾）を用いた。高耐食性ハステロイの化学成分を表1に示す。供試材の大きさは、φ12×33 mmで図1の形状とし、下部8 mmにはM8雄ネジ加工を施し、多成分切削動力計のネジ穴に固定できるようにした。供試材の硬さはマイクロビッカース硬度計にて測定した結果 252 HVであった。

2.2 加工方法及び切削油剤供給方法

ドリル加工を表2に示す切削条件でマシニングセ

表2 切削条件

工具	超硬オイルホール付きドリル 不二越製アクアドリル
工具回転数	398 min ⁻¹
送り量	0.04 mm/rev
送り速度	15.9 mm/min
切削速度	15 m/min
切削油剤	水溶性切削油 10%希釈
切削油条件	①UFB 無 + 標準圧内部給油 ②UFB 無 + 7MPa 内部給油 ③UFB + 標準圧内部給油 ④UFB + 7MPa 内部給油

ンタ（ヤマザキマザック株式会社製）にて実施した。ドリルは、オイルホール付きドリルを用いて、工具刃先へ切削油剤が供給されるようにした。切削油剤の供給は、UFB を入れずに標準圧で供給したものの、UFB を入れずに高圧クーラントシステム（株式会社トクビ製）を用いて7 MPaの圧力で供給したものの、UFB を入れ標準圧で供給したものの、UFB を入れ7 MPaの圧力で供給したものの4条件にて各2回ずつ加工を行った。実験は、2日間かけて行い、1日目の午前に高圧クーラントのみの試験を実施した。UFB を用いた試験は、UFB 発生器を用いると切削油剤温度が上昇することから、常温で使用するため、1日目の午前からUFB 発生器（日本タングステン株式会社製）を12時間稼働させ、UFB を最大量含有させた。次に1日目の夜に自然冷却させ、常温としてから2日目に実験に用いた。UFB は、簡易な含有評価方法で、実験直前にクーラントタンク内切削油にUFB が含有することを確認した。

2.3 ドリル刃先内部の温度測定

ドリル刃先内部の温度を熱電対法により測定を行った。熱電対法による測定システムの構成を図2に示す。ドリルには、放電加工によりφ1 mmの穴を

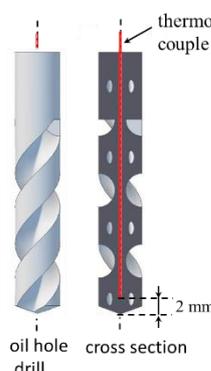
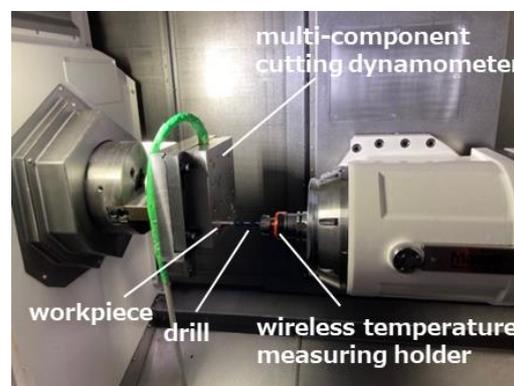


図2 熱電対法による測定システム構成及び熱電対取り付け位置

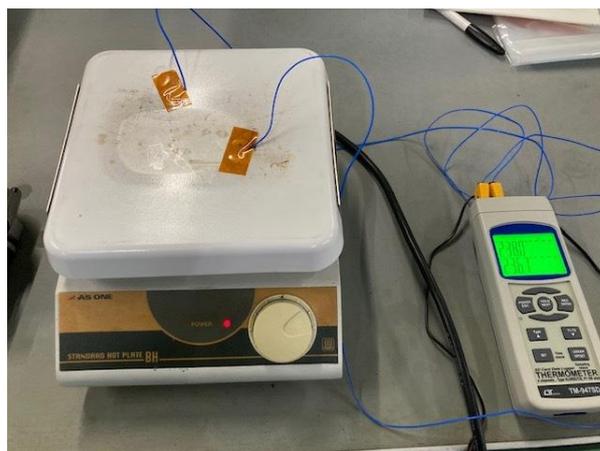
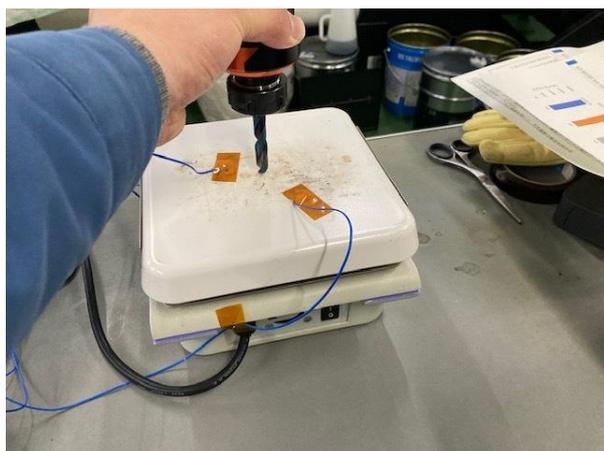


図3 刃先温度の推定曲線測定方法

ドリルのシャンクからドリルの刃先先端 2 mm まであけ、穴の先端まで K 型熱電対を挿入した。ドリルは、芯厚が小さいと通常の切削条件では破損する恐れがあるため、芯厚が十分に確保できる $\phi 10$ mm ドリルを用いた。熱電対から計測データを取り出すため、専用ツールホルダ（株式会社山本金属製作所製 Multi Intelligence）を用いて、ホルダから無線にて計測データを送信し、受信器を介してパソコンで受信し、計測を行った。

2.4 ドリル刃先先端温度の推定

前項で測定したドリル刃先内部の熱電対温度は、刃先先端から 2 mm の位置での温度であるため、ドリル先端の温度を算出するために次の補正を実施した。推定方法を図 3 に示す。補正は、熱容量の大きいホットプレートの温度を 100, 150, 200, 250, 300 °C と変化させ、各温度でドリル刃先をホットプレート上面に 60 ~ 80 秒間接触させ、その時のドリル刃先内部の熱電対温度を測定した。接触時間を 60 ~ 80 秒としたのは、今回の切削条件において実際に加工を行っている時間と同じにするためである。また、ホットプレート上面に K 型熱電対を 2 つ貼り付け、実際のホットプレート上面の温度を確認した。ドリル先端温度は、十分な時間ホットプレートと接触させているため、ホットプレート上面温度をドリル先端温度と仮定し、ドリル先端温度とドリル刃先内部の熱電対の温度から推定曲線を作成し、加工時のドリル刃先内部の熱電対の温度からドリル先端温度を算出した。推定曲線の作成にあたっては、1 回の計測における 60 ~ 80 秒までの間の平均値を用いた。

3. 実験結果及び考察

3.1 ドリル刃先内部熱電対温度の測定結果

高耐食性ハステロイをドリル加工した際の切削油剤供給方法毎のドリル刃先内部熱電対温度の結果を図 4 に示す。ドリル刃先内部の熱電対温度は、UFB を入れずに標準圧で供給した条件では、27.6 °C、UFB を入れずに高圧クーラントを用いた条件では 23.9 °C、UFB を入れ標準圧で供給した条件で 30.6 °C、UFB を入れ高圧クーラントを用いた条件は 25.5 °C であった。4 条件でのドリル刃先内部の熱電対温度に対して分散分析を行った結果、UFB を入れた場合と入れない場合に有意差 ($F(1, 7.71)$, $P=0.00071 < 0.05$) があり、クーラント圧力が標準圧と高圧 (7 MPa) においても有意差 ($F(1, 7.71)$, $P=0.00005 < 0.05$) が認められた。

3.2 推定曲線

2.4 項の方法によりドリル先端温度の推定のため作成した推定曲線を図 5 に示す。推定曲線ではドリル刃先内部の熱電対温度とドリル先端温度を線形近

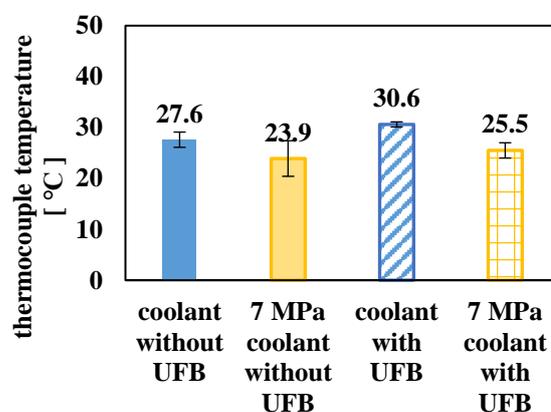


図4 ドリル加工時の熱電対温度

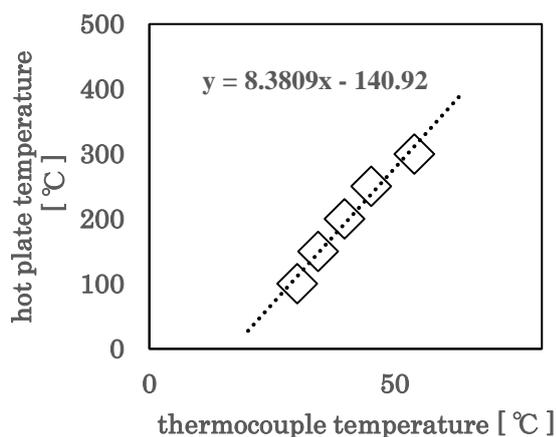


図5 ドリル先端温度の推定曲線

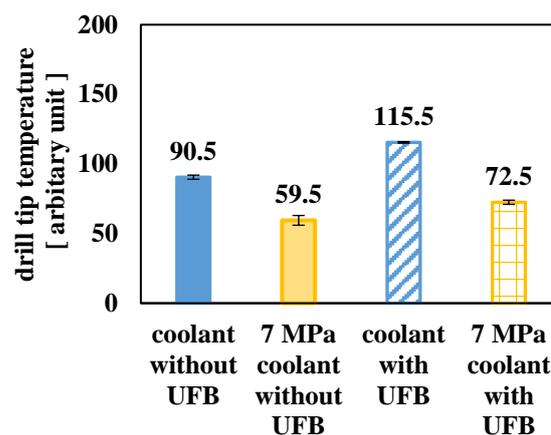


図6 ドリル先端温度の推定値

似した。なお推定曲線から推定したドリル先端温度の単位については任意単位 (arbitrary unit, 文中では略して a.u.と表記) として記載した。これは、オイルホール付きドリルに切削油剤が入っていない状態で推定曲線のデータを測定しているが、実際の加工では、ドリル内部のオイルホール内を切削油剤が流れることにより、オイルホールと熱電対を挿入するためにドリルに空けた穴は繋がっていないものの、ドリル内部の熱電対が冷やされるため、実際の温度より低く推定していると考えられるためである。本報告では推定曲線から算出したドリル先端温度は実際のドリル先端温度とは違う可能性がある事に留意し、あくまで本方法を用いた場合の相対比較を行う事を目的として任意単位を使用した。

3.3 推定したドリル先端温度

図5の推定曲線を用いて図4のドリル刃先内部の熱電対温度の結果からドリル先端温度を推定した結果を図6に示す。推定したドリル先端温度は、UFBを入れずに標準圧で供給した条件では 90.5 a.u., UFBを入れずに高圧クーラントを用いた条件では 59.5 a.u., UFBを入れ標準圧で供給した条件では 115.5 a.u., UFBを入れ高圧クーラントを用いた条件では 72.5 a.u.であった。4条件における推定したドリル先端温度について3.1項と同様に分散分析を行った結果、UFBを入れた場合と入れない場合に有意差 ($F(1, 7.71)$, $P=0.00077 < 0.05$) があり、クーラント圧力が標準圧と高圧 (7 MPa) においても有意差 ($F(1, 7.71)$, $P=0.00057 < 0.05$) が認められた。

3.4 考察

高圧クーラントを用いた時のドリル先端温度は、

標準的な圧力で切削油を供給した場合に比べ、34%低下していた。これは、高圧クーラントを用いた場合、ドリル刃先近傍で高圧による高流量の切削油が流れることでドリル刃先が通常より冷却されるためと考えられる。またUFBを入れたものは、UFBを入れなかった場合に比べて、27%温度が上昇していた。これは、切削油の熱伝達率は $5316 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、空気の熱伝達率は $4.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ であり、本試験条件での切削油と切削油中の水に含有されるUFBの体積比は $99.9:7.4 \times 10^{-9}$ であるため、UFBの入った切削油の熱伝達率は約 $5311 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と計算でき、UFBを入れた場合の温度上昇が想定されるより大きいように思われた。実験後の機内において、UFBを用いた際に切削油剤が白濁しており、マイクロバブル・ナノバブルをクーラントに適用した報告⁸⁻⁹⁾によると、ナノバブルが入ったクーラントは透明であり、マイクロバブルが入ったクーラントは白濁するため、UFBクーラントをドリル刃先に供給した際に加工穴内部でマイクロバブルが発生していた可能性が考えられた。また、UFBを入れたものに高圧クーラントを用いた場合のドリル先端温度は、UFBを入れたものと高圧クーラントを使用した場合のドリル先端温度の中間的な温度となり、ドリル先端温度20%低下していた。以上の結果より、Ni基合金のドリル加工時に高圧クーラントを用いることで、ドリル先端温度を下げられる効果がある事を示唆していた。

4. 結言

Ni基合金である高耐食性ハステロイを対象とし

たドリル加工において切削油に UFB の有無、標準圧と高圧(7MPa)を組み合わせた4条件にて、オイルホール付きドリルの刃先温度の測定を行い、各切削油におけるドリル刃先の冷却性を調べた。その結果、以下の事が明らかとなった。

1. UFB を入れずに高圧クーラントを使用した場合には、UFB を入れずに標準圧で切削油を供給した場合に比べて、推定曲線により推定したドリル先端温度が 34 %低下していた。
2. UFB を入れた切削油を標準圧で供給した場合は、推定曲線により推定したドリル先端温度は、UFB を入れず標準圧で供給したかっただのみに比べて 27 %上昇していた。その理由として、ドリル加工時の加工穴内部でマイクロバブル (MB) が発生していた可能性が考えられる。
3. UFB を入れた切削油を高圧 (7MPa) で供給した場合には、UFB を入れずに標準圧で切削油を供給した場合に比べて、ドリル先端温度が 20 %低下し、UFB のみ、高圧クーラントのみを使用した場合の中間的な結果であった。

謝辞

本研究は、経済産業省 令和元年度～令和3年度戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン事業) において実施され、高洋電機株式会社 高祖様、西尾様、辻様の協力を得て実施されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山田真司ほか: “Ni 基耐熱合金の切削加工における各種冷却法の検討”. 日本機械学会 2014 年度年次大会, S1320202 (2014)
- 2) 山田真司ほか: “Ni 基耐熱合金の切削加工における工具摩耗特性”. 第 10 回生産加工・工作機械部門講演会, A08, p10-11 (2014)
- 3) 帯川利之ほか: “切削シミュレーションによるニッケル基超耐熱合金の被削性評価”. 精密工学会誌, 69(1), p105-109 (2003)
- 4) 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.
- 5) 帯川利之ほか: “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”. 生産研究, 67(6), p607-612 (2015)
- 6) 猪谷彦太郎ほか: “高圧注液による難削材の高効率切削加工”. 三菱重工技報, 35(2), p148-151 (1998)
- 7) 菅原克生ほか: “高耐食性ニッケル基合金 MAT21”. Zairyo-to-Kankyo, 49, p541-543 (2000)
- 8) 岩井学ほか: “マイクロ・ナノバブルクーラントの除去加工の研究 (第 2 報: 高機能マイクロ・ナノバブルクーラントによる除去加工性能)”. 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p281-282 (2018)
- 9) 鈴木清ほか: “マイクロバブルクーラントによる切削加工 (第 1 報: 簡易マイクロバブルクーラント発生装置の開発)”. 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, p101-102 (2004)