

技術資料



Technical Data

非磁性ドリルカラーの内径段付き加工技術の開発

光齋 悠矢*

Development of Bottle Boring Cutting Technology for a Non-Magnetic Drill Collar

Yuya KOSAI

Synopsis

In recent years, in oil drilling technology, electronic devices are required to measure location information and underground information (produced fluid, gas, rock quality, etc.) in real time when drilling while exploring. For the product shapes of the drill collar that encases these devices, after drilling in the center of the work material in order to install a sensor, multiple inner diameter grooves are machined with a special cutting tool. It is known that this machining method has a relatively small inner diameter in relation to the prepared hole. However, there are few studies on bottle boring cutting technology that is long and more than twice the inner diameter.

So, in this study, we conducted a preliminary verification by a trial test with a smaller scale in the bottle boring cutting of a non-magnetic drill collar, which is a long hollow bar with a length of less than 10 m. As a result, reproducibility was confirmed by verification with an actual machine.

1. 緒 言

近年、石油・天然ガス掘削技術において、高温高压深井戸の開発や高腐食環境井戸の開発などにより、掘削部品の性能要求はより厳しくなっている¹⁾。掘削方法も従来の垂直掘りだけでなく、陸上から沖合油田への掘削や海上基地からの多数掘りのような傾斜掘りが増加している。この傾斜掘りには、掘削するドリルビットの位置情報を把握するための地磁気測定器が必要であり、探査しながら掘削する場合では、位置情報に加えて地下情報（産出流体、ガス、岩質など）を得るために、電磁抵抗やガンマ線スペクトル、岩層密度などをリアルタイムに測定できる電子機器が必要となる。それぞれがドリルカラーに埋め込まれるため、計測精度を向上させるためには地磁気の影響を排除する必要があり、ケーシングの役

割を果たすドリルカラーには非磁性であることが求められる。加えて、地下数千メートルで使用するため、地圧に耐えうる強度や、硫化水素などに対する耐食性も要求される。また、新たな油田やガス田の開発のため、従来よりも過酷な環境下で掘削が行われることが多くなっている^{2), 3)}。

ドリルカラーの製品では、内部にセンサを設置するため、被削材の中心に穴明け加工を実施した後に、特殊な切削工具で複数の内径溝を加工する（以下、本加工方法を内径段付き加工という）。本加工方法はドリルカラーだけでなく、航空機のランディングギアやエンジンシャフトの内径プロファイル加工でも用いられており、これらを対象とした場合、下穴に対して内径寸法が比較的浅い加工事例はよく確認されている。しかしながら、長尺で内径寸法の2倍以上の内径溝を有する内径段付き加工

2021年9月29日 受付

* 大同特殊鋼株式会社技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

の事例はほとんどない。また、これらの部品に採用される素材は伸びが大きい切屑断断性が悪く、切屑処理に関する種々の問題が発生しやすい。内径段付き加工において被削材内部で発生した切屑を適切に処理できなかった場合は、穴内で切屑が堆積するために加工継続が困難になる。さらに、工具に切屑が巻き付くことで加工面の粗度の悪化を招き、長い切屑は作業者の安全性を低下させる原因となる⁴⁾。

そこで本研究では、長さ10 m弱の長尺中空材である非磁性ドリルカラーの内径段付き加工において、スケールを小さくした模擬評価試験による事前検証を実施した。その後、実機による検証で再現性を確認した。

2. 実験方法

2. 1 供試材

本実験に用いた被削材 DNM[®]110 の化学組成を Table 1 に示す。DNM[®]110 は窒素の固溶強化および加工硬化を利用した高窒素オーステナイト系ステンレス鋼である。窒素添加による固溶強化と適正な温度での温間加工による加工硬化を複合的に利用することで 756 MPa 以上の 0.2 % 耐力を確保している⁵⁾。本実験で使用した素材は、固溶化熱処理後、温間鍛造を実施し、硬さ HBW=302 を得た。その後、旋削加工にて直径 175 mm × 209 mm とした後に、穴明け加工にて直径 83.3 mm の貫通穴を加工したものを切削試験片とした。

Table 1. Chemical composition (mass%).

Material	Mn	Ni	Cr	Mo	Fe
DNM [®] 110	15.0	3.0	18.0	1.0	Bal.

2. 2 試験方法

2. 2. 1 実態模擬試験による切屑評価

内径段付き加工の高能率、高品質を両立させるには、切屑処理問題の対策が必須であると予想される。一般的な切削において切屑形状は Fig. 1 のように分類され⁶⁾、その中でも切屑排出性が良好な切屑形状は「Long comma chips」または「Short comma chips」である⁷⁾とされている。最適な切屑形状を検討するため、内径段付き加工の模擬評価装置を作製した。Fig. 2 に切削条件の評価に使用した治具の模式図を示す。加工機は DMG 森精機(株)製の複合加工機 NT4200 DCG を使用した。工具主軸に取り外し可能な L 字の内径段付き用工具を取り付け、B 軸を

90°回転させた後、工具の長手方向が加工機の Z 軸と水平になるようにした。加工機の下刃物台にはクーラント供給装置を取り付け、ワークの工具主軸側から Z 軸のマイナス方向にクーラントが流れるようにした。

切屑形状の確認に使用した Cutting tool A の工具形状と切削条件を Table 2 に、Cutting tool B の工具形状と切削条件を Table 3 にそれぞれ示す。また、Cutting tool A と Cutting tool B におけるツールパス模式図を Fig. 3、Fig. 4 にそれぞれ示す。Cutting tool A は X 軸方向に切込量 1.0 mm のプロファイル加工で Z 方向に加工し、Cutting tool B は Z 軸方向に切込量 4 mm の突切り加工で X 軸方向に加工するツールパスでそれぞれ固定した。切削工具は Cutting tool A が幅 6 mm、ノーズ R 3.0 mm の工具を用い、Cutting tool B は幅 5 mm、ノーズ R 0.8 mm の市販の突切り工具をそれぞれ使用した。切削条件は切削速度を 30 ~ 50 m/min 範囲で変化させ、送り速度は 0.1 ~ 0.2 mm/rev の範囲で変化させた。

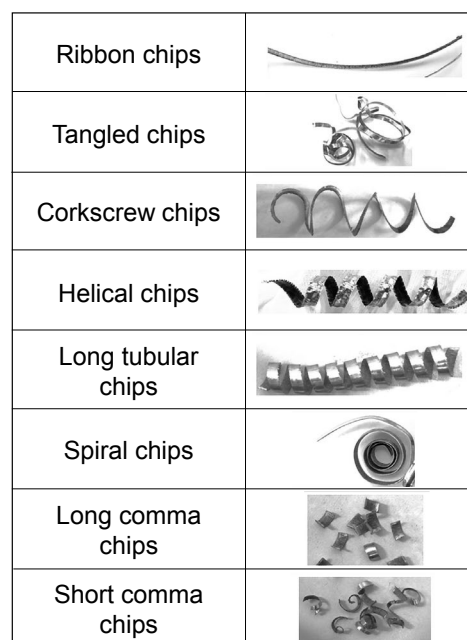


Fig. 1 Example of chip shapes in general cutting.

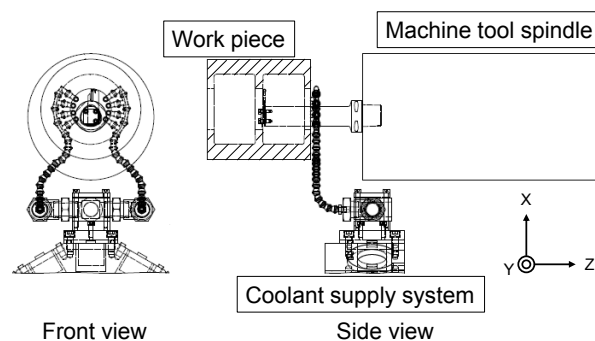


Fig. 2. Test equipment.

Table 2. Cutting tool A and cutting conditions.

Cutting tool A	
Type of tool	Round tool
Material	Cemented carbide
Coating	PVD TiAlN
Cutting width	6.0 mm
Corner radius	3.0 mm
Clearance angle	7°
Depth of cut maximum	2.8 mm
Cutting edge	2
Cutting conditions	
Cutting velocity	30, 40, 50 m/min
Feed rate	0.1, 0.15, 0.2 mm/rev
X-axis depth of cut	1.0 mm
Coolant	WET

Table 3. Cutting tool B and cutting conditions.

Cutting tool B	
Type of tool	Grooving tool
Material	Cemented carbide
Coating	PVD TiAlN
Cutting width	5 mm
Corner radius	0.8 mm
Clearance angle	7°
Depth of cut maximum	3.0 mm
Cutting edge	2
Cutting conditions	
Cutting velocity	30, 40, 50 m/min
Feed rate	0.1, 0.15, 0.2 mm/rev
Z-axis depth of cut	4.0 mm
Coolant	WET

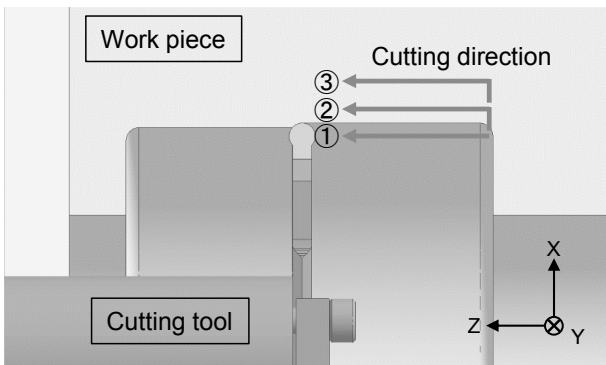


Fig. 3. Machining pass of cutting tool A.

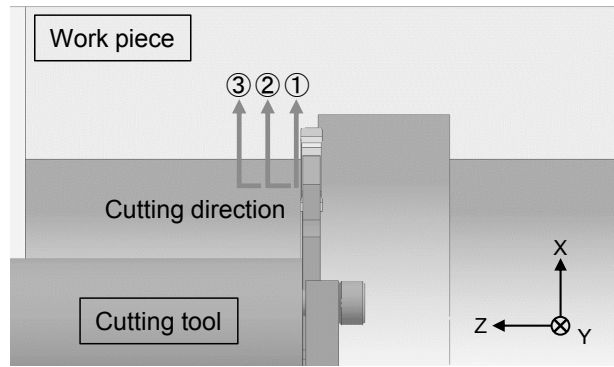


Fig. 4. Machining pass of cutting tool B.

2. 2. 2 切屑強制破碎試験方法

本実験で使用した被削材 DNM[®]110 は、切屑処理に大きく影響する材料特性である引張強さが 986 MPa、伸びが 36% と非常に大きい^{5), 8)} ため、2. 2. 1 項で検討した切削条件やツールパスの変更だけでは切屑処理の問題が解決できない可能性がある。そこで、加工能率は低下するが、加工途中にエアカットの追加を検討した。エアカットの模式図を Fig. 5 に示す。エアカットとは、被削材と工具を強制的に切り離すことで切屑を分断させることができる加工方法である。Cutting tool B はツールパスが突切り加工であり、自動的にエアカットが追加されることから、Cutting tool A のプロファイル加工にのみエアカットを適用した。その切削条件を Table 4 に示す。切削速度は 30 m/min、送り速度は 0.2 mm/rev、切込量 1.0 mm で固定し、プロファイル加工とした。エアカットの方向は X 軸方向と Z 軸方向、エアカット量は 1.0, 3.0 mm で変化させた。

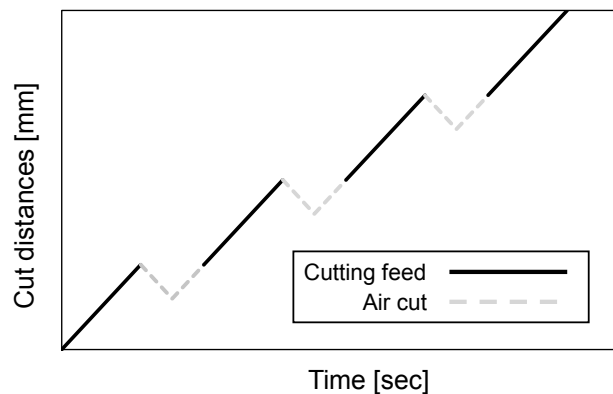


Fig.5. Schematic diagram of air cut.

Table 4. Cutting tool A and cutting conditions adding air cut.

Cutting conditions	
Cutting velocity	30 m/min
Feed rate	0.2 mm/rev
X-axis depth of cut	1.0 mm
Air cut direction and distances	X-axis 1.0, 3.0 mm Z-axis 1.0, 3.0 mm
Coolant	WET

3. 結果および考察

3. 1 切屑排出性評価試験結果

Fig. 6に、Cutting tool Aを使用し、プロファイル加工したときの切屑形状の変化結果を示す。送り速度が0.1, 0.15 mm/rev のとき、切込量や切削速度に関わらず、切屑形状は Fig. 1 に示す「Tangled chips」であり、切屑排出性が最も悪い切屑形状であることが確認できた。一方で、送り速度0.2 mm/rev では「Long tubular chips」であることが確認でき、切屑排出性が良化した。これは送り速度の増加により切屑厚みが増加し、切屑の剛性が向上したため、一定のカールが形成されたと考えられる。

Fig. 7に Cutting tool Bを使用し、突切り加工したときの切屑形状の変化結果を示す。切屑形状は送り速度0.1 mm/rev ~ 0.2 mm/rev の範囲では、「Long tubular chips」であることが確認できた。これは、プロファイル加工に比べて切込量が大きく、送り速度が小さい条件であっても切屑が十分に厚くなるためであると考えられる。これらの結論から Cutting tool A の切屑と比較すると切屑長さが大幅に短くなり、切屑排出性は良化したことから、加工方法は突切り加工にすることが切屑処理には有効であると考えられる。

ここまでの評価試験では、最も切屑排出性が良好とされている「Short comma chips」を得ることができなかった。さらなる改善のため、中山の切屑折断条件⁹⁾を用いて考察する。切屑表面ひずみ ϵ は式 (1) で表される。

$$\epsilon = \frac{t_2}{2} \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_L} \right) \quad (1)$$

ここで、 t_2 は切屑厚さ、 R_0 は切屑の最初の半径、 R_L は工具刃先から切屑が離脱するための半径である。

この切屑表面ひずみが被削材の破断ひずみより大きくなった場合に切屑が破碎される。そのため、切屑厚みを厚くし、生成された切屑のカール径を小さくすることが有効であることがわかる。よって、送り速度0.2 mm/rev 以上に設定し、さらに切屑厚さを厚くすること、切屑の

カール半径を小さくするために、最適なチップブレーカの選定、すくい面の真実接触面積の減少や被削材・工具間の摩擦係数の減少が有効であると考えられる。また、切削速度を減少させることでチップブレーカに加わる力が増加し、切屑厚みが厚くなることが知られており¹⁰⁾、切削速度は低速に設定することも有効であると考えられる。

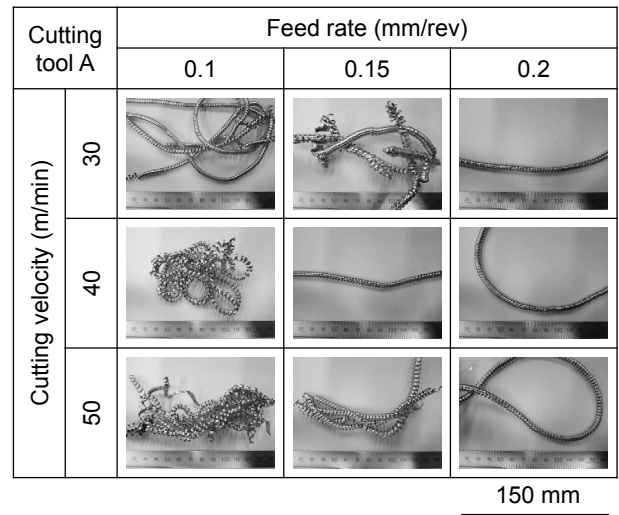


Fig. 6. Chip shapes for cutting tool A.

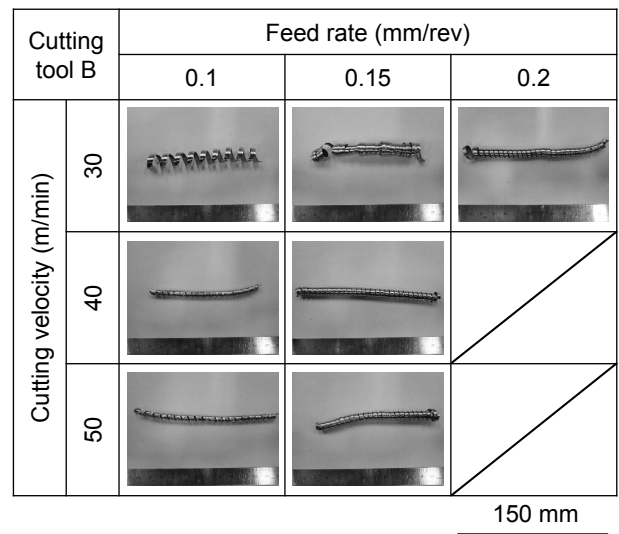


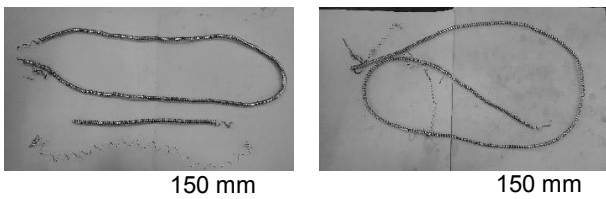
Fig. 7. Chip shapes for cutting tool B.

3. 2 切屑強制破碎試験結果

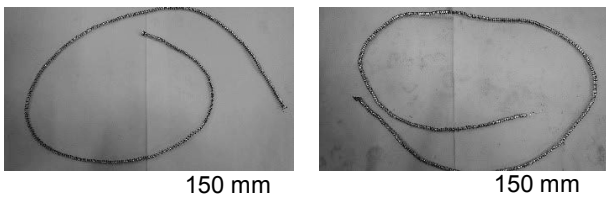
Cutting tool Aを使用し、切削条件をX軸方向の切込量1 mm、送り速度0.2 mm/revで固定し、エアカットの方向を変化させたときの切屑形状の変化を確認した。Z軸方向にエアカットを1 mm、3 mm追加したときの切屑形状を Fig. 8、X軸方向にエアカットを1 mmと3 mm追加したときの切屑形状を Fig. 9にそれぞれ示す。

Z軸方向にエアカットを1 mm追加したときは短い切屑と長い切屑の2種類が確認された。これは、工具先端の送り方向のたわみ量が大きいため、エアカットされている部分でも加工が継続されていたと考えられる。Z軸方向にエアカットを3 mm追加したときは長い切屑のみ排出が確認されたため、エアカット時には加工していないことがわかる。X軸方向にエアカットを1 mmと3 mm追加したときは長い切屑のみ排出が確認されたため、エアカット時には加工していないことがわかる。

以上から、エアカットはX軸方向であることが望ましいが、エアカットを採用しない場合に比べ、加工能率の大幅な低下を避けることができないため注意が必要となる。



(a) Air cut 1 mm (b) Air cut 3 mm
Fig. 8. Chip shapes for air cut of Z-axis direction.



(a) Air cut 1 mm (b) Air cut 3 mm
Fig. 9. Chip shapes for air cut of X-axis direction.

3. 3 実機による検証試験

模擬評価試験の結果を基に実機サイズでの検証を実施した。実機による検証には長さ10 m以上のワークを加工可能なBTA加工機を使用した。この加工機に取り付けた特殊L字工具の模式図をFig. 10に示す。工具と可動式インナーロッドの間には互いにセレーションが刻まれており、インナーロッドをZ軸方向に移動させることで工具先端をX軸方向に移動させることができる。また、工具先端は模擬評価試験と同様の工具が取り付け可能である。被削材はDNM[®]110を使用した。試験片は、旋削加工にて直径175 mm×長さ9753 mmとした後に、BTA加工にて直径83.3 mmの貫通穴を加工したものとした。

模擬評価試験の結果から決定したCutting tool AとCutting tool Bの切削条件をTable 5, Table 6にそれぞれ示す。Cutting tool AはX軸方向の切込量1.0 mmのプロファイル加工で切削速度30 m/min, 送り速度0.1, 0.2 mm/revとし、Cutting tool BはZ軸方向の切込量4 mmの突切り加

工で切削速度30 m/min, 送り速度0.2 mm/revとした。

実機検証でのCutting tool Aの切屑形状をFig. 11に、Cutting tool Bの切屑形状をFig. 12にそれぞれ示す。Cutting tool Aの送り速度0.1 mm/revでは「Tangled chips」、送り速度0.2 mm/revでは「Long tubular chips」、Cutting tool Bでは「Long tubular chips」であり、模擬試験と同様の切屑形状であったことから、模擬試験が、実機をよく再現することが確認できた。

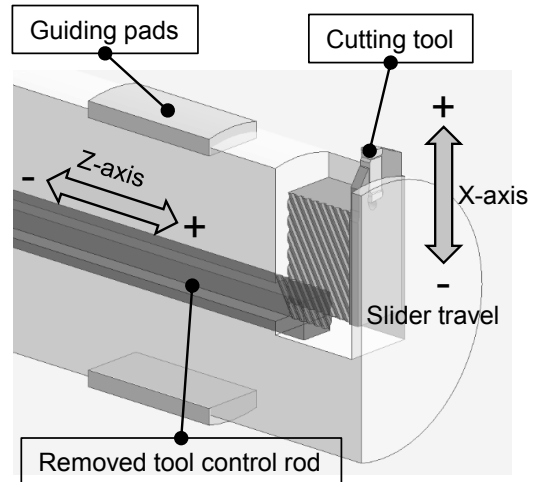


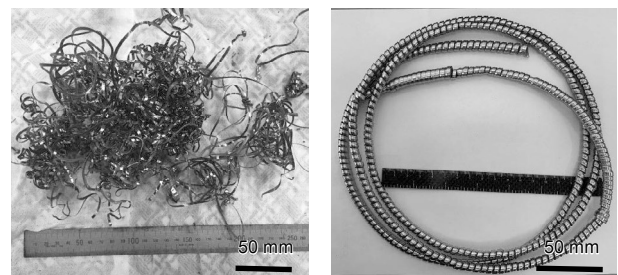
Fig. 10. Special L-shaped cutting tool.

Table 5. Cutting tool A and cutting conditions.

Cutting conditions	
Cutting velocity	30 m/min
Feed rate	0.1, 0.2 mm/rev
X-axis depth of cut	1.0 mm
Coolant	WET

Table 6. Cutting tool B and cutting conditions.

Cutting conditions	
Cutting velocity	30 m/min
Feed rate	0.15 mm/rev
Z-axis depth of cut	4.0 mm
Coolant	WET



(a) Feed rate = 0.1 mm/rev (b) Feed rate = 0.2 mm/rev
Fig. 11. Chip shapes for cutting tool A.

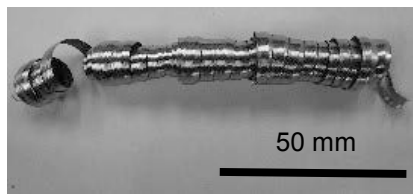


Fig. 12. Chip shapes for cutting tool B.

3. 4 最適加工方法の選定

これまでの試験結果から、それぞれの工具に対して最適な切削条件を検討した。加工能率の比較を Fig. 13 に示す。プロファイル加工では X 軸方向の切込量 1.0 mm、切削速度 30 m/min、送り速度 0.2 mm/rev とし、エアカット時間は総加工時間の 0%、10% とした。突切り加工では Z 軸方向の切込量 4.0 mm、切削速度 30 m/min、送り速度 0.15 mm/rev とし、エアカット時間を総加工時間の 20% とした。プロファイル加工に比べ、突切り加工では 2.7 倍の高効率で加工することができ、さらに、切屑排出性の高い切屑が排出されるため、突切り加工を採用することが内径段付き加工を高効率で加工するために最適であると考えられる。

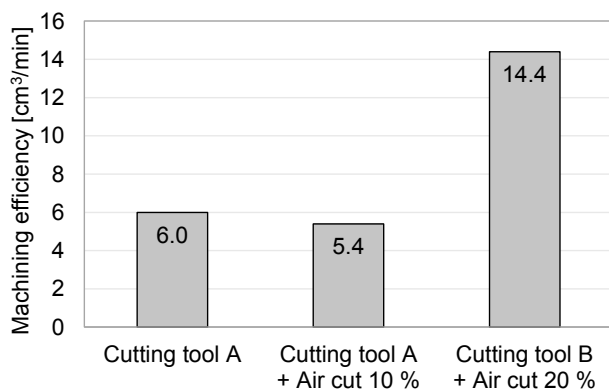


Fig. 13. Machining efficiency for each processing method.

4. 結 言

非磁性ドリルカラーの内径段付き加工において、模擬評価試験を実施し、以下の結果を得た。

- 1) 模擬評価試験により実機の切屑状態を再現することができた。
- 2) 内径段付き加工では、切屑形状と加工能率から、突切り工具で切込量 4.0 mm、切削速度 30 m/min、送り速度 0.15 mm/rev 以上が最も有効な切削方法であることが確認された。

- 3) プロファイル加工で内径段付き加工をする場合は、排出性の良い切屑形状にするために、送り速度は 0.2 mm/rev 以上に設定し、径方向にエアカットを 1 mm 以上追加することが有効であることが確認された。

※ DNMは大同特殊鋼(株)の登録商標です。

(文 献)

- 1) 岩本理彦: 石油技術協会誌, 78(2013), 5, 376.
- 2) 石川浩一, 植田茂紀, 清水哲也, 栗原優介, 関口秀明: までりあ, 48(2009), 2, 85.
- 3) 大同特殊鋼(株): 電気製鋼, 83(2012), 1, 75.
- 4) 窪田英毅, 田部井英世, 佐藤崇: 精密工学会誌, 60(1994), 11, 1611.
- 5) 成田修二: までりあ, 55(2016), 10, 465.
- 6) Osamah Fadhil Abdulateef: Journal of Mechanical Engineering Research and Development, 44(2021), 1, 346.
- 7) 日本機械学会 編: 機械工学便覧, 日本機械学会, 1991, B2-127.
- 8) 山根八州男, 関谷克彦: 精密工学会誌, 70(2004), 3, 407.
- 9) 中山一雄: 精密機械, 38(1972), 12, 82.
- 10) 中山一雄: 日本機械学会論文集, 27(1961), 178, 833.



光齋悠矢