

## 重点研究

## 高圧水素用ステンレス鋼のドリル加工におけるバリ抑制手法の開発

岡村 弘太\* 植竹 大輔\* 曾田 将来\*

Development of Method for Burr Suppression  
in Drilling of Stainless Steel for High-pressure Hydrogen  
OKAMURA Kota, UETAKE Daisuke and SOTA Masaki

高圧水素用ステンレス鋼 SUS316L のドリル加工におけるバリ抑制を目的に、ドリル加工条件及び被削材への加工硬化の影響について検討した。出口面のばりの高さは1刃送りの影響が大きく、送りを小さくすることでばりの高さを抑制できた。また、被削材に加工硬化を発生させた場合もばりの高さを抑制できることが分かった。この結果を踏まえてドリル加工出口面表層に加工硬化を発生させることを目的に2ステップ加工を試行したところ、ばりの高さを0.13mmに抑制するドリル加工が可能となった。

Key Words: ドリル, ばり, 切削加工, ビッカース硬さ

## 1 はじめに

水素ステーションや燃料電池車に使用される高圧水素用ステンレス鋼は、利用拡大が見込まれており、金属加工業においてはその加工への対応・検討が急務となっている。しかし、これらの材料は加工実績が少なく、その加工特性について未知な部分が多い。そのため、材料の特性等の把握及び加工方法の確立が必要である。

金属の部品加工では、ほとんどの場合穴あけ加工が行われ、その手法はドリル加工が大きな割合を占めている。ドリル加工では、被削材から切り粉として分断せずに残った残留部が塑性変形することで、穴の出口にばりが発生する。ばりは、部品の機能や品質の悪化につながるため、製造現場ではばりの除去作業工程が必要となり、その工程が加工時間や加工コストの増大を招き、加工の高能率が阻害されている。そのため、ばりの抑制は企業の長年の課題となっており、製造現場で対応できる、加工時におけるバリ抑制の手法が求められている。SUS316Lなどの高圧水素用ステンレス鋼は、他のオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304など)と比較してNiが多く延性が高いため、加工硬化が小さいとされ<sup>1)</sup>、ドリル加工において、塑性変形しやすく、ばりが大きくなることが予想される。我々は昨年度の研究により、SUS304のドリル加工において、材料内部を意図的に加工硬化させてからドリル加工を行うこと

によってばりを抑制できる可能性を見いだした<sup>2)</sup>。

既往研究として鉄鋼材や非鉄、SUS304を対象としたドリル加工でのばりの抑制に関する報告<sup>3), 4)</sup>や超音波スピンドルを使用したばりの抑制に関する報告<sup>5)</sup>があるものの、一般的なドリルやスピンドルを使用した高圧水素用ステンレス鋼のドリル加工におけるばりに着目した報告例は見当たらない。

そこで、本研究では、SUS316Lのドリル加工における穴の出口ばりを抑制するため、ドリル加工条件並びに被削材への加工硬化の影響について検討した。

## 2 研究の方法

## 2.1 ドリル加工

加工機はマシニングセンタ(オークマ(株)製 MB-56VA)を用い、工具は直径4mm 2刃刃超硬ドリル((株)不二越製 AQDEXS0400)を使用した。ドリルの先端角は135°である。被削材はSUS316L(縦140mm, 横20mm, 厚さ5mm)、試験片の加工は湿式で行い、水溶性切削液を使用した。実験の様子を図1に、加工条件を表1に示す。切削速度と1刃送りの2因子を2水準に振って組み合わせた4条件を設定し、1条件に対して2穴ずつ加工を行った。

また、回転式切削動力計(日本キスラー(株)製 9123B)を用いて、加工時のスラストを測定した。

\* 栃木県産業技術センター 県南技術支援センター

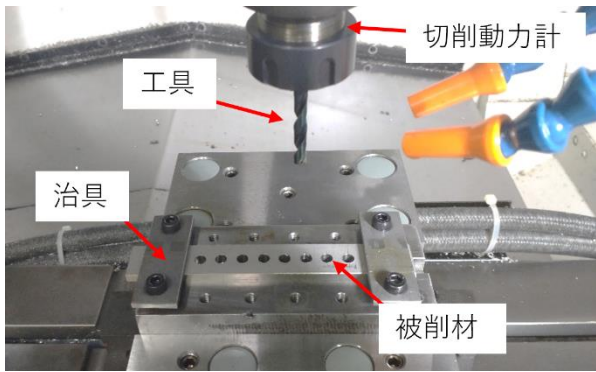


図1 実験の様子

表1 加工条件

| 加工条件 | 切削速度<br>[m/min] | 1刃送り<br>[mm/刃] |
|------|-----------------|----------------|
| ①    | 20              | 0.02           |
| ②    | 40              | 0.02           |
| ③    | 20              | 0.04           |
| ④    | 40              | 0.04           |

## 2.2 ばりの高さの測定

ドリル加工であけた穴を精密切断機で半分に切断し、穴の断面が観察できるよう樹脂埋め、鏡面研磨を行った。ばりの高さの評価には、金属顕微鏡(オリンパス(株)製 GX71)を用い、加工の出口面とばりの先端の距離をばりの高さとした。なお、1穴に対して2つのばりの高さを測定した。撮影したばりを図2に示す。



図2 金属顕微鏡で撮影したばり

## 2.3 加工硬化誘起材の貫通穴加工

昨年度の研究結果から、材料内部の硬化がばりの高さに影響する可能性があるため、本研究においても材料内部を硬化させる手法をとった。次の2つの方法で意図的に加工硬化を発生させた被削材を作製し実験を行った。

1つ目は引張試験機を用いて加工硬化を発生させる手法である。油圧万能試験機((株)東京衡機試験機製 YU500S5)により最大点通過直後まで被削材に引張荷重を印加した。荷重最大点は51kNである。引張荷重印加

後の被削材(以下、引張材)を図3に示す。引張荷重で発生したネッキングの中央部においてドリル加工を行った。

2つ目はフライス加工である。ドリル加工の出口側の面に対してフェイスミルを用いてフライス加工を行った。フライス加工後の被削材(以下、フライス材)を図4に示す。切削条件は切削速度160m/min, 1刃送り0.15mm/刃, 切込0.1mmで、表面を1回切削した。



図3 引張材



図4 フライス材

## 2.4 ばりの硬さの測定

ドリル加工後の加工硬化を見るためにばりの断面の硬さを測定した。硬さの評価には、ワイドレンジビッカース硬さ試験機((株)フューチャアテック製 FLV-10ARS-F)を用いて測定を行った。試験荷重は0.9807Nで、1つのばりに対して根元、中間の2か所のビッカース硬さの測定を行った。なお、使用したSUS316Lの母材硬さはHV180程度であった。

## 3 結果及び考察

### 3.1 ばりの高さ

発生したばりの高さ加工条件の関係を図5に示す。なお、ばりの高さは条件ごとの平均値で表している。

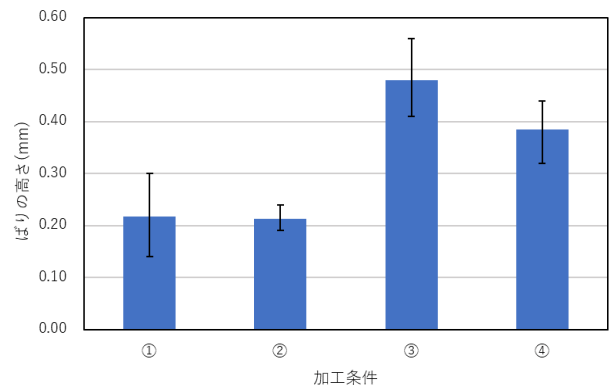


図5 ばりの高さ加工条件の関係

1刃送りが大きくなるとばりの高さも大きくなった。切削速度によるばりの高さは1刃送りほど変化しなかった。このことから、ばりの高さは1刃送りの影響が大きいと言える。

### 3. 2 スラスト挙動

加工条件②で加工したときのスラストとトルクのグラフを図6に示す。

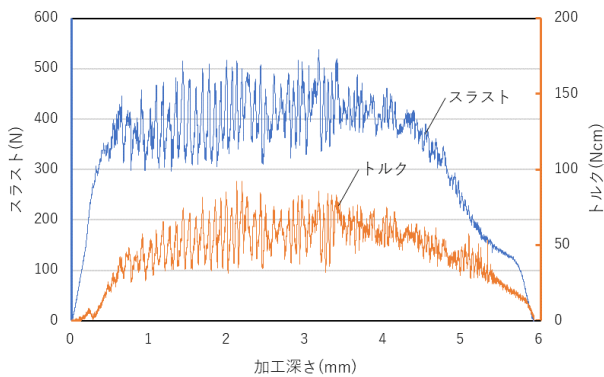


図6 ドリル加工におけるスラストとトルク

スラストの挙動として、ドリル先端が被削材に達し(加工深さ 0mm)、加工が始まると同時にスラストが増加し、ドリルが肩まで被削材に侵入するとその後スラストは一定となり、ドリル先端が出口面に達するとドリル底面下残留部の変形が始まり、その進行に伴いスラストが低下していると考えられる。

ばりの生成に関しては、貫通直前の挙動の影響が大きいと考えられるため、加工条件ごとの貫通直前のスラストを図7に示す。

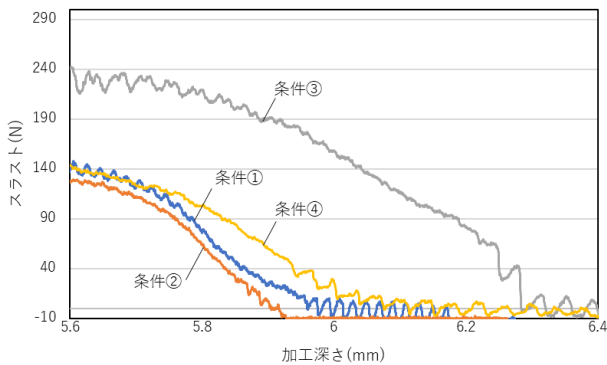


図7 貫通時のスラストの挙動の比較

加工深さが約 5.6mm の地点でドリル肩が出口面に達し、その後スラストが大きく減少していく。加工条件ごとのスラストの傾きを比較すると、条件②が最も傾きが急で、次いで条件①、条件④、そして条件③が最も傾きが緩やかであった。このことから、図5の結果と併せて見ると、ばりが小さいほど貫通直前のスラストの傾きが急である。これは、ばりが大きい場合はドリル肩が出口面に達してからの残留部の変形が大きく、一方でばりが小さい場合は比較して変形が小さい状態で貫通していると考えられる。

### 3. 3 加工硬化誘起材の貫通穴加工

引張材とフライス材に対して、材料内部の硬さをビッカース硬さ試験機を用いて測定した。2. 1 で使用した、未処理の被削材(以下、市販材)と比較した結果を図8に示す。

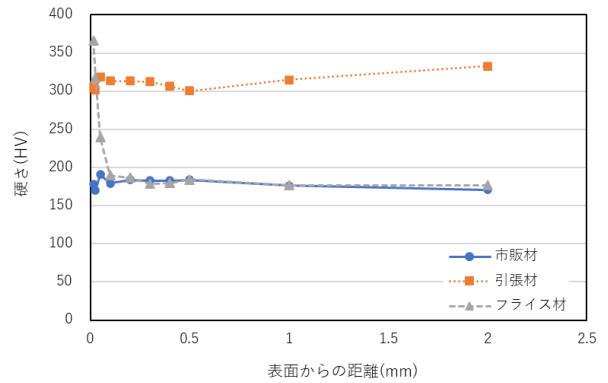


図8 各被削材の内部の硬さ

まず、市販材は材料内部全体が HV180 前後であるのに対して、引張材は材料内部全体が HV320 前後となり、市販材と比較して約 1.5 倍硬化していた。フライス材は、表面から 0.1mm 以上の深さの領域では母材硬さと変わらないが、表面から 0.1mm までの深さの領域で急激な硬化が見られた。つまり、引張荷重印加により材料内部全体の均一な硬化、フライス加工により材料表面層のみの硬化が確認された。

引張材とフライス材に対して、2. 1 と同じくドリル加工を行った。ばりの高さや加工条件の関係を図9に示す。なお、1 条件に対して 2 穴ずつ加工を行った。

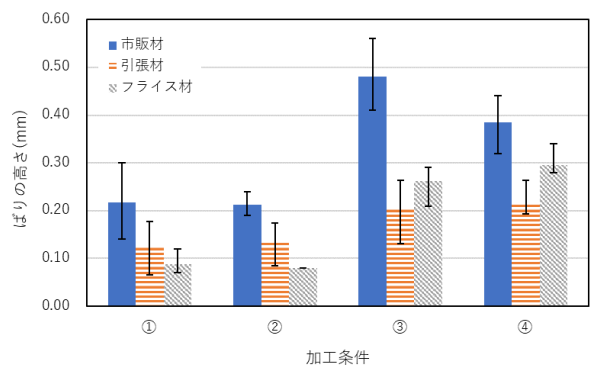


図9 各被削材のばりの高さや加工条件の関係

引張材とフライス材のばりの高さは、市販材と同様に1刃送りが小さいとばりの高さが減少し、切削速度はばりの高さにあまり影響が見られなかった。また、市販材と比較すると、全加工条件において引張材、フライス材ともにばりの高さが小さくなった。この結果により、材料内部の硬化によってばりの発生を抑制で

きることが分かった。特に、材料内部全体の硬化でなくとも、出口面表層のみの硬化でもばりの抑制に十分な効果が確認された。

### 3. 4 ばりの硬さ

市販材、引張材及びフライス材のドリル加工において発生したばりの硬さと加工条件の関係を図10に示す。なお、ばりの硬さは条件ごとの平均値で表している。

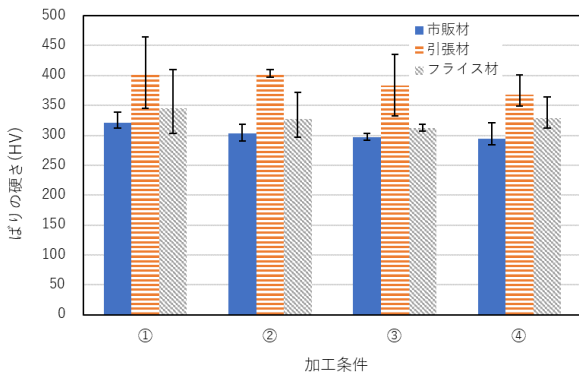


図10 前処理被削材のばりの硬さと加工条件の関係

すべての被削材と加工条件において、ばりは母材よりも硬化していた。1刃送りが大きくなるとばり硬さが少し小さくなる傾向があるが、条件ごとにそれほど大きな差はなかった。引張材及びフライス材について、市販材よりもばりの硬さが大きいですが、条件ごとの違いはあまりなかった。また、引張材とフライス材を比較すると、図9のばりの高さの大小関係がばりの硬さには反映されなかった。このことから、SUS316Lにおいてばりの高さとは必ずしも関係性があるとは言えない。

### 3. 5 加工条件の検討

出口面表層の硬化がばりの発生に影響を及ぼすことから、現場での利用を想定して工数をなるべく増やさず、ドリルのみで意図的に出口面表層に硬化を発生させる方法を検討した。

ドリル加工において貫通直前にドリルの進行を止め、その場でドウェルさせることで、ドリル底面に接する面及び切り残し部を硬化させ、その後貫通させる2ステップ加工で実験を行った。出口面からドリル肩までの距離を切り残し量として、この量を変化させ、ばりとの関係を見た。なお、1ステップ目は加工条件④、2ステップ目は図2においてばりが小さかった加工条件②、ドウェルの秒数は1秒で実験を行った。

まず、切り残し量による材料内部の硬さを測定するため、ドウェル後2ステップ目に移行せずドリルを上げて止め穴加工を行い、穴の断面が観察できるサンプル

を作製した(図11)。なお、切り残し量は、ノギスで測定した板厚とドリル先端部長さから計算される穴深さにより調整した。このサンプルで行った硬さ試験の結果を図12に示す。

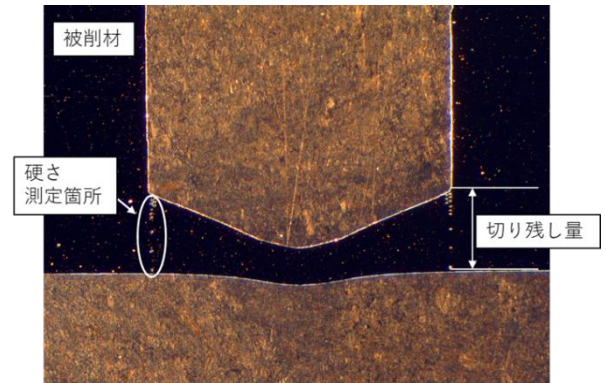


図11 硬さ測定用サンプル

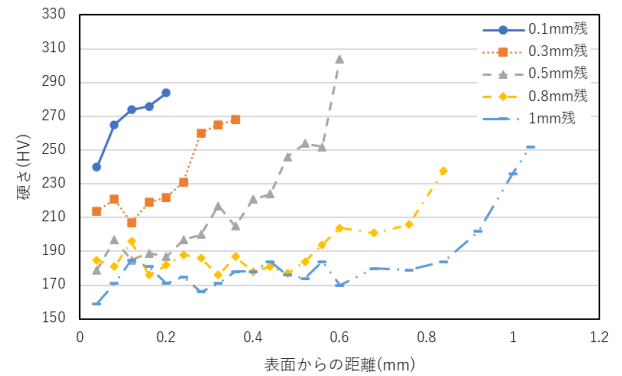


図12 切り残し量による材料内部の硬さ

切り残し量が小さいほど表層が硬化していた。これは、切り残し量が小さいほどドリル底面で発生した加工硬化の影響が表層まで及ぶためである。また、切り残し量が小さくなるほど表層がドリルに押されて塑性変形するため、その変形による加工硬化の影響もあると考えられる。

以上の結果を踏まえて2ステップ加工を行い、ばりの高さを測定した。その結果を図13に示す。なお、1条件に対して2穴ずつ加工を行った。

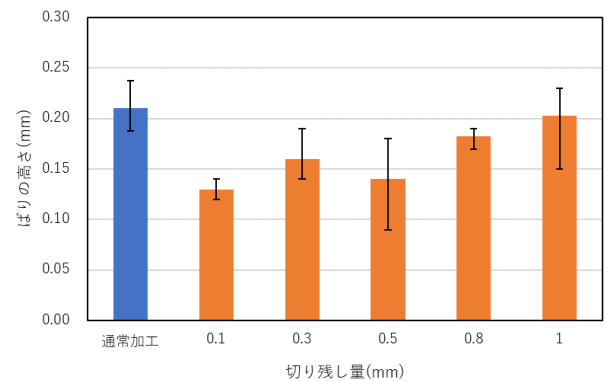


図13 切り残し量によるばりの高さ

1 ステップ目での切り残し量を小さくすることで、出口面表層の加工硬化を大きくし、破断させることでばりの高さが小さくなった。通常加工と 0.8mm と 1mm の場合のばりの高さが同程度なのは、出口面表層に加工硬化が及ばないためと考えられる。これらの結果は 2. 3 で行った実験との整合性が取れており、ドリル加工の出口面表層の硬化によってばりを抑制できることが分かった。

#### 4 おわりに

SUS316L のドリル加工において、加工条件による加工硬化とばりの関係及び、ばりを抑制する加工条件について検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) ばりの高さは 1 刃送りの影響が大きく、1 刃送りを小さくすることでばりが小さくなった。
- (2) ばりが小さいほど貫通直前のスラストの傾きが急であった。
- (3) ドリル加工前の被削材に対して引張試験やフライス加工を行うことで、材料内部及びドリル加工の出口面表層に加工硬化が発生し、ばりの高さが抑制された。

- (4) ドリル加工中に送りを変化させる 2 ステップ加工を行うことで、ドリル加工の出口面表層に加工硬化が発生し、ばりの高さが抑制された。

#### 謝 辞

本研究を実施するにあたり多大なるご指導をいただいた東京電機大学工学部機械工学科 田村 昌一 教授に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) ステンレス協会編：“ステンレス鋼便覧—第 3 版—”，日刊工業新聞社，568，(1995)
- 2) 岡村 弘太，西宮 紹：“栃木県産業技術センター研究報告”，No. 20，83-86，(2023)
- 3) 安木 誠一，藤原 久一：“大阪府立産業技術総合研究所報告”，No. 28，27-31，(2014)
- 4) 和田 浩明，吉田 薫：“精密工学会誌”，66(7)，1109-1114 (2000)
- 5) 田口恭輔，吉原信人，原圭祐，水野雅裕：“Journal of the Japan Society for Abrasive Technology”，63(12)，624-629 (2019)