研究論文

ステンレス鋼の温間再絞り加工

田村　信[*]　相田　収平[**]　杉井　伸吾[*]　片山　聡[***]

Warm Redrawing of Stainless Steel

TAMURA Makoto[*], AIDA Shuhei[**], SUGII Shingo[*] and KATAYAMA Satoshi[***]

抄　録

温間深絞り加工法はステンレス鋼加工の基盤技術として知られている。本研究では温間加工法を再絞り工程に適用し，多段絞りにおける工程削減を目的に温間再絞りの研究を行った。その結果，通常の再絞り率 80%に対して，55%という高い再絞り率を実現し，焼鈍工程を含めた 3 工程の工程削減効果を示すとともに，耐食性に影響する加工誘起マルテンサイト変態量を大幅に低減できることを示した。

1. 緒　　言

SUS304 などオーステナイト系ステンレス鋼は引張強さの温度依存性が強く，0～100℃の比較的扱いやすい温度範囲での変化が大きい。また，変形に伴い加工誘起マルテンサイト変態が発現するが，成形温度の上昇とともに加工誘起マルテンサイト変態量が減少し，とくに成形温度 90℃ではほとんど変態を起こさない。オーステナイト系ステンレス鋼はこのような性質を生かした温間絞り加工法を用いることで成形限界が飛躍的に向上することが知られている [1)]。

多段絞りにおいて第 1 絞りに温間絞り加工法を適用している事例は見られるが，第 2 絞り以降の再絞りではヒーターの配置や冷却方法が困難なため利用されていない。再絞りに温間絞り加工法を適用することにより，再絞り率向上による工程の削減および加工誘起マルテンサイト変態の抑制が期待できる。

本研究では，温間再絞り用金型の試作および温間再絞りの成形条件が成形性に与える影響を検討した。

2. 温間再絞り用金型の試作

再絞りには直接再絞りと逆再絞りの 2 形式がある。本研究では直接再絞り方式を採用し，30° のテーパー付きダイスとした。試作した金型の概要を図 1 に示す。金型のダイスおよびしわ抑えはヒーター加熱方式，パンチは水冷却

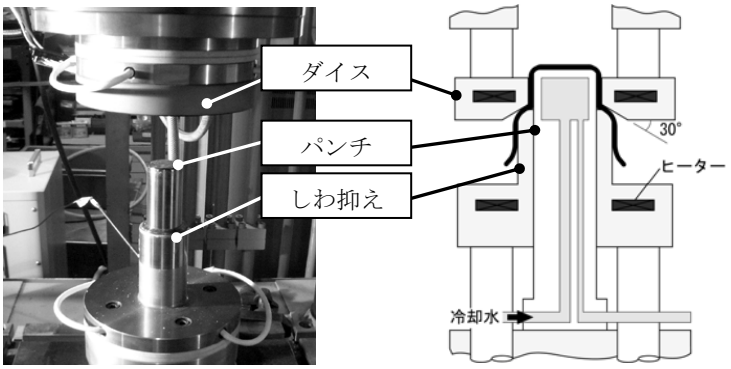

図 1　再絞り金型概要

[*] 研究開発センター
[**] 下越技術支援センター
[***] 中越技術支援センター

方式とした。直接再絞り金型は，パンチおよびしわ抑えが近接しており温度制御が難しい。そのため，パンチ内部中央からの噴水方式として冷却を効率的に行うように工夫し，それぞれ安定した温度制御を可能とした。なお，パンチ肩半径は 3mm，ダイス肩半径は 4mm とし，再絞り率（＝再絞りパンチ径/第 1 絞りパンチ径×100）は 80，70，65，60，55，50 および 45%の金型を試作した。 なお，再絞り率は数値が小さいほど細く深い容器が成形できることを示し，成形難易度が高い。

3. 温間再絞り成形性

3.1 供試材

供試材は SUS304（公称板厚 0.8mm）を用いた。供試材の引張試験は，圧延方向に対して 0°，45°および 90°の方向に JIS Z 2201 による 13B 号試験片を採取し，精密万能試験機（（株）島津製作所製　AG-250KNI）により実施した。試験条件は初期クロスヘッド速度を 3mm/min，ひずみ 5%以降は 10mm/min とした。また，試験温度を 20℃，100℃および 150℃で行った。

機械的性質の温度依存性を図 2 に示す。150℃における引張強さは 20℃に比べ約 40%減少し，0.2%耐力は約 25%減少する。また，破断伸びは約 40%減少する。0.2%耐力の異方性を図 3 に示す。圧延方向に対して 45°方向が弱く，本研究で使用した SUS304 は異方性が認められる。

再絞り試験に用いる第 1 絞り成形品は，パンチ径 φ60mm，絞り比（＝初期ブランク径/第 1 絞りパンチ径）2.0，2.4 および 2.6 の 3 種類である。第 1 絞りの成形条件を表 1 に示す。なお成形には油圧塑性加工試験機（株式会社アミノ製，インナー能力 1274kN，アウター能力 686kN）を使用した。

3.2 試験方法

再絞り試験は，試作した円筒再絞り用金型を用い，成形性の評価に加え，加工誘起マルテンサイト変態量，板厚など成形品の品質を調べた。成形性は破断をおこさず成形可能な再絞り率で評価した。

試験条件はしわ抑え力を 10kN とし，ダイスおよびしわ抑えの温度を 70～200℃，パンチ温度を-7～20℃とした。潤滑剤は第 1 絞り後の成形品内外面に水溶性プレス工作油（日本工作油株式会社製　G-2576W）を塗布した。試験装置は油圧塑性加工試験機（株式会社不二越製，ア

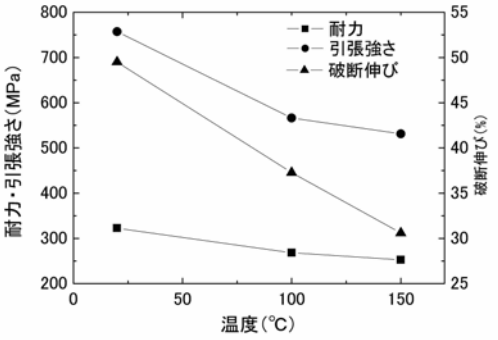

図 2　機械的性質の温度依存性

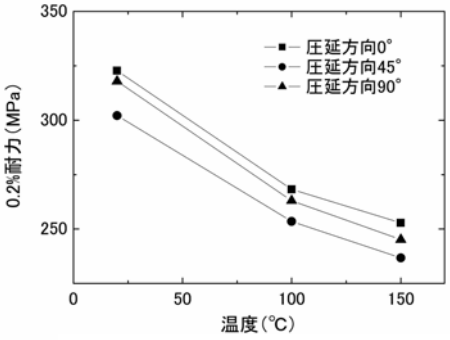

図 3　0.2%耐力の異方性

表 1　第 1 絞り成形条件

金型	材質	SKD11硬質クロムメッキ
	パンチ径	60mm
	パンチ肩半径	3mm
	ダイス径	61.8mm
	ダイス肩半径	5mm
成形条件	潤滑	PTFEシート（厚さ0.05mm）
	しわ抑え力	110kN
	絞り速度	8mm/sec
	パンチ温度	3±1℃
	ダイス温度	120±2℃

ウター能力 294kN，ダイクッション能力 245kN）を使用した。加工誘起マルテンサイト変態量はフェライトスコープ（株式会社フィッシャー・インストルメンツ製　MP30E-S）を用い測定した。

3.3　試験結果

3.3.1　第 1 絞り成形後の品質

第 1 絞り成形品（絞り比 2.6）の板厚分布を図 5，測定位置を図 4 に示す。パンチ頭部は板厚が減少しており，さらにパンチ肩部では局部的な板厚減少が見られる。また，供試材の機械的性質の異方性から，パンチ肩部およびフランジ付近は円周方向の板厚の差が大きい。この傾向は絞り比 2.0，絞り比 2.4 の成形品についても同様であった。

各成形品の加工誘起マルテンサイト変態量を図 6 に示す。図中に比較対照として室温（30℃）成形した成形品の結果を示す。温間絞りした成形品はパンチを冷却していること，また，パンチ肩部で極端な板厚減少が生じているため，パンチ肩部における加工誘起マルテンサイト変態量は，絞り比 2.6 では約 8%，絞り比 2.0 では約 1%測定されたが，室温成形に比べて変態量が大幅に抑制されていることが確認できる。いずれの成形品についてもパンチ肩部で増加が見られるが側壁部ではほぼ 0 を示している。

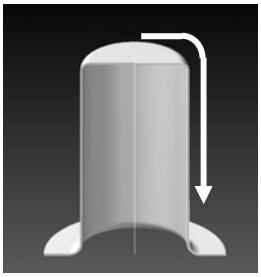

図 4　板厚，フェライト量測定位置

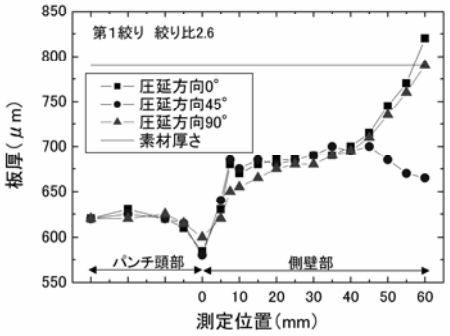

図 5　第 1 絞り成形品（絞り比 2.6）

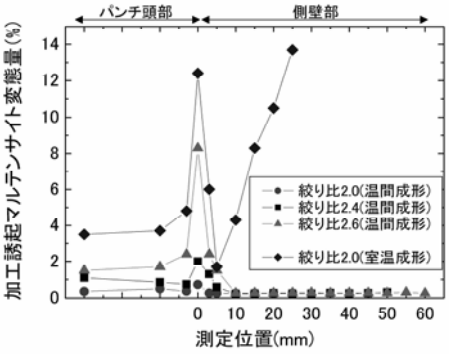

図 6　各サンプルの加工誘起マルテンサイト変態量

表 2　再絞り試験結果

再絞り率	45%							×	×	×
	50%									
	55%				×	×	×	○	○	○
	60%				○	○	○			
	65%				○	○	○			
	70%	×	×	×	○	○	○			
	80%	○	○	○						
成形条件	第1絞り 絞り比	2.0	2.4	2.6	2.0	2.4	2.6	2.0	2.4	2.6
	ダイス温度	30℃			120℃			200℃		
	しわ抑え温度	30℃			80±5℃			200±5℃		
	パンチ温度	30℃			20±5℃			-7±1℃		

図 7　温間再絞り成形品外観

3.3.2　再絞り成形性

再絞り試験の結果を表 2，成形品外観を図 7 に示す。ダイスおよびしわ抑え温度 30℃では，限界再絞り率は 80%であった。それに対してダイスおよびしわ抑え温度を上げることで成形限界は向上し，ダイス温度を 120℃，しわ抑え温度を 80℃とすることで限界再絞り率が 60%に向上する。さらにダイスおよびしわ抑え温度を 200℃，パンチ温度を-7℃とすることで，限界再絞り率は 55%となった。再絞り成形性は成形温度条件に依存することがわかる。また，本試験条件では第 1 絞りの絞り比には影響されなかった。

再絞りでは過大な板厚減少が生じるパンチ肩部で破断する。そのため破断しやすいパンチ肩部の強度を高めるため，パンチ肩部の冷却が重要である。また，ダイス，しわ抑えの温度は材料の流入抵抗に影響することから，成形限界を高めるためにはそれらの温度を高く設定することが有効である。温間絞り加工法は再絞りに効果的に作用し，再絞り率 55%でアスペクト比 3.3（＝成形高さ/（再絞りパンチ径＋板厚×2））という非常に深い成形が可能となった。

従来，同等の形状を得るためには，第 1 絞りを温間で行ったとしても，その後に 4 工程（焼鈍 1 工程，再絞り 3 工程）を必要とした。それに対して，本研究で開発した温間再絞りによると，再絞り工程 1 工程でその形状を得ることができ，3 工程の工程削減効果がある。

3.3.3　再絞り後の品質

再絞り率 60%の板厚分布を図 8 に示す。再絞り後，板厚はパンチ肩部で局部的な減少を生じている。また，第 1 絞りで局部的に板厚減少があったパンチ肩部は，図中に示した部位にあたるが，その部分の板厚変動は少ない。この現

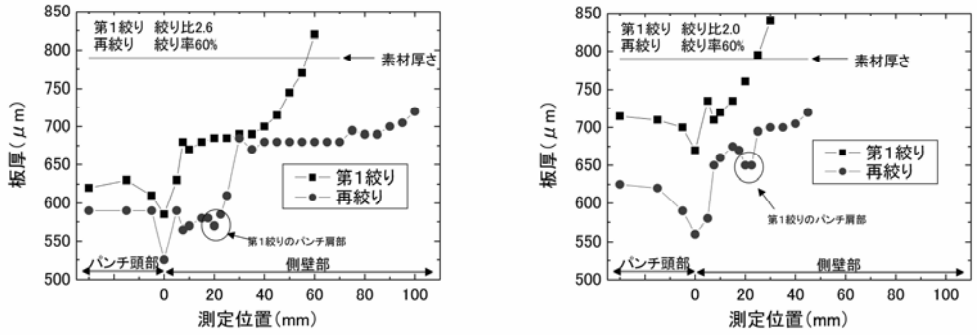

図 8　再絞り率 60%の板厚分布
（左：絞り比 2.6　右：絞り比 2.0）

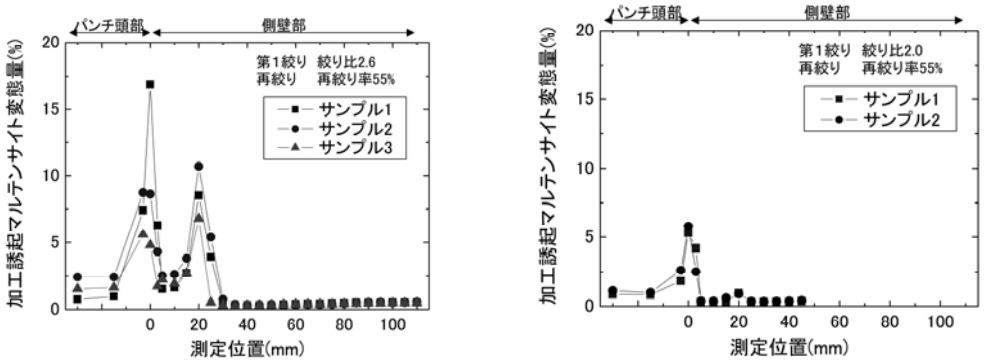

図 9　再絞り率 55%の加工誘起マルテンサイト変態量
（左：絞り比 2.6　右：絞り比 2.0）

象は加工硬化が影響しているためと考えられ，第 1 絞りにおけるパンチ肩部の板厚減少は再絞りの成形限界に大きな影響をおよぼさないことがわかる。

再絞り後，絞り比 2.6 では側壁部の板厚分布が大きい。第 1 絞りの絞り比 2.6 ではパンチ頭部の板厚減少が大きく，側壁部との板厚差が大きいためである。第 1 絞りの板厚分布が再絞り後の品質に影響を及ぼすことがわかる。

再絞り率 55%の加工誘起マルテンサイト変態量を図 9 に示す。パンチ肩部で絞り比 2.0 は 5%程度，絞り比 2.6 は 7～17%であった。このばらつきはダイス温度およびパンチ温度が安定しないことが原因と考えられ，ヒーター配置等を見直す必要がある。また，図 9 に示したサンプル 3 では最大で 7%である。加工誘起マルテンサイト変態量は置き割れと相関があり，一般的には 10%以上が置き割れ危険領域と言われている [2]。置き割れに対しては温度条件を安定させることで，最終焼鈍を省略できる可能性が高いことがわかる。

3.3.4 再絞り温度低減策

これまで，温間再絞り成形性について検討し，成形温度と成形性の関係を把握することができた。ダイスおよびしわ抑え温度が高いほど成形性が向上し，限界再絞り率 55%を得ることができる。しかし，ダイスおよびしわ抑え温度を 200℃に設定する必要があり，実用上は低温化が望まれる。再絞りの成形温度を低減する試みとして，第 1 絞り後の加工誘起マルテンサイト変態量が成形温度と成形性に与える影響について検討した。

温間成形した第 1 絞り後の成形品（絞り比 2.0）を焼鈍した。図 10 に焼鈍後の加工誘起マルテンサイト変態量を示す。加工誘起マルテンサイト変態量は，焼鈍を施すことでほぼ 0%となる。同様に絞り比 2.4 および 2.6 の成形品を焼鈍し，再絞り試験を実施した結果を表 3 に示す。再絞り率は絞り比 2.0 では 45%，絞り比

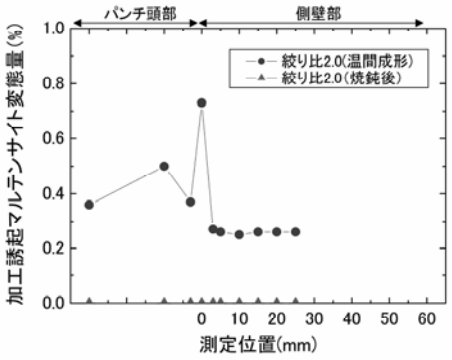

図 10　焼鈍後の加工誘起マルテンサイト変態量

表 3　再絞り成形性（焼鈍後）

再絞り率	45%	○	×	×
	50%	○	○	○
	55%			
	60%			
	65%			
	70%			
	80%			
成形条件	第1絞り 絞り比	2.0	2.4	2.6
	ダイス温度	150℃		
	しわ抑え温度	150±1℃		
	パンチ温度	-4±1℃		

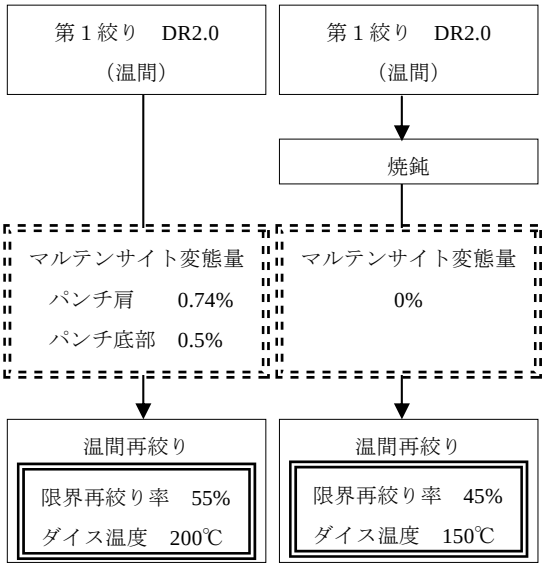

図 11　加工誘起マルテンサイト変態量の影響

2.4 および絞り比 2.6 では 50%であった。また，ダイスおよびしわ抑えの温度は 150℃で成形が可能である。

加工誘起マルテンサイト変態量が成形性と再絞り温度条件に与える影響を図 11 に示す。前述の絞り比 2.0 の焼鈍なしの温間絞りをした場合では，加工誘起マルテンサイト変態量はパンチ底部で 0.5%，パンチ肩部で 0.74%であり，限界再絞り率は 55%となり，ダイスおよびしわ抑えの温度は 200℃が必要である。それに対して，焼鈍を行うことで，成形限界が向上し，成形温度の低減が可能である。加工誘起マルテンサイト変態量が再絞り成形性と再絞り温度条件に関連し，第 1 絞り後の加工誘起マルテンサイト変態量を抑制することが，再絞り温度の低減に有効であることがわかる。

温間絞り加工法は，ダイスおよびしわ抑えを加熱することにより材料の流入抵抗を低減させ，パンチ冷却によって破断しやすいパンチ肩部の強度を高くすることで成形限界を向上させる。その温度領域は引張強さの変化の大きな 0～100℃程度の範囲を利用している。ここで，ステンレス鋼 SUS304 の引張強さはそれ以上の領域でも温度上昇とともに減少傾向を示す。また，90℃以上の温度領域ではマルテンサイト変態を起こさないことから，第 1 絞りでのマルテンサイト変態を抑制する目的でパンチ温度を 80℃，ダイスおよびしわ抑え温度を 220℃に設定し，高い温度領域の温度差を利用した絞り成形を試みた。その概念図を図 12 に示す。また，成形条件を表 4，結果を表 5 に示す。この温度領域を利用した場合，加工誘起マルテンサイト変態量が最も多いと思われるパンチ肩部で 0%であった。

この条件では再絞り試験を実施していないが，焼鈍を施したサンプルと同様に，成形性の向上および再絞り温度の低減が期待できる。金型構造上，温度制御が難しい再絞り工程を低温化し，金型構造が単純な第 1 絞りを高温化する方法は実用的な方法として期待できる。

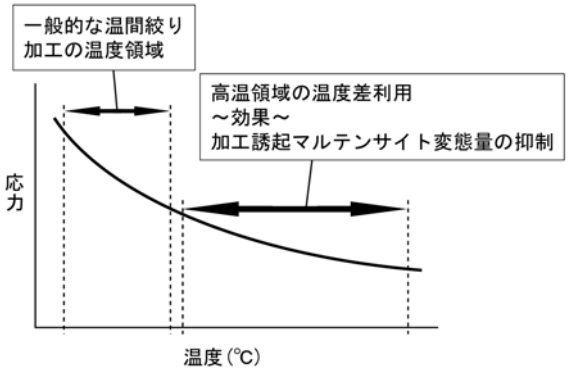

図 12　高温領域利用温間絞り加工概念図

表 4　第 1 絞り成形条件

金型	材質	SKD11硬質クロムメッキ
	パンチ径	40mm
	パンチ肩半径	3.8mm
	ダイス径	42.1mm
	ダイス肩半径	3mm
成形条件	潤滑	PTFEシート（厚さ0.05mm）
	しわ抑え力	50kN
	絞り速度	5mm/sec

表 5　第 1 絞り成形品のパンチ肩部の加工誘起マルテンサイト変態量

ダイス温度	100℃	220℃
しわ抑え温度	100℃	220℃
パンチ温度	0℃	80℃
変態量	1.4%	0%

4. 結　　言

（1）温間絞り技術による工程短縮を実現するため，温間再絞り成形試験を実施した。室温での限界再絞り率 80%に対して，温間再絞りでは 55%であった。この結果，焼鈍工程も含めて 3 工程の工程削減の可能性を示した。

（2）再絞り成形後の加工誘起マルテンサイト変態量を 10%以下に抑制することができ，第 3 絞り以降も焼鈍工程を省略できる可能性を示した。

（3）再絞り金型は構造上，金型の温度制御が難しいため，再絞り温度低減方法について検討した。第 1 絞りの温度を従来より高くすることで焼鈍したサンプルと同等の加工誘起マルテンサイト変態量となる。その結果再絞り工程の成形温度を低減できる可能性を示した。

参考文献

1) 渡部豈臣，“ステンレス鋼板の温間絞り加工法”，塑性と加工，33，375，1992，p.396.

2) 鋸屋正喜，塑性加工学会ステンレス鋼板のプレス成形分科会資料，28，1983.