

技術論文

サーボプレス機を活用したNSSC 2120[®]の角筒成形性向上

Improvement of the Square Shell Drawability of NSSC 2120[®] Sheet by Using a Servo Press Machine

櫻庭 拓也*
Takuya SAKURABA

石丸 詠一郎
Eiichiro ISHIMARU

川 真知
Masatomo KAWA

抄 録

日鉄ステンレス(株)独自鋼種である NSSC 2120 は高強度特性を活かし薄板用途において SUS304 代替による市場拡大を目指している。SUS304 は種々の用途に使用されているため、同形状への成形を可能にすることが必須である。そこで、プレスモーションを自由に設定可能なサーボプレス機を利用し、角筒成形性を向上させる方法を検討した。その結果、プレスモーションをステップモーションへ変更することで、材料流入の制御を可能とし、ウォールブレイクを回避できる。以上の効果により、SUS304 と同等の角筒成形性が得られることを確認した。

Abstract

We aim to expand NSSC 2120 market share by replacing SUS304 in sheet applications. SUS304 has diverse uses, so the formability of NSSC 2120 into sheets is a requirement. We explored methods of enhancing its the square shell drawability, using a servo press machine whose press motion can be freely configured. Adopting a step motion avoids crack formation by controlling material inflow. In this way, the square shell drawability similar to that of SUS304 was achieved in NSSC 2120.

1. 緒 言

リーン型二相ステンレス鋼はオーステナイト系ステンレス鋼と比較し、価格変動の大きい Ni や Mo などのレアメタルの添加量を抑えることで省資源かつ価格安定性の高い鋼種である。日鉄ステンレス(株)では独自リーン型二相ステンレス鋼として SUS304, SUS316 代替を可能とする NSSC 2120 と NSSC[®] 2351 を開発した。これらの鋼種の特徴のひとつに既存のオーステナイト系ステンレス鋼と比較し高強度であることが挙げられる。この特性による薄肉軽量化をユーザー享受可能なメリットとして発信しており、今後適用範囲の拡大が見込まれる。一方で、薄板用途ではプレス技術の発展とともに要求される加工形状が複雑化している。高延性で様々な加工形状へ成形可能な SUS304 から NSSC 2120 への代替は、難しいことが想定される。

そこで、二相ステンレス鋼の成形性を向上させることを目的にサーボプレス機を活用した成形方法の開発に取り組んでいる。サーボプレス機はクランクの駆動力にサーボモーターを利用していることから、プレスモーションを自由に設定できるため、Punch 速度の加減速や途中止め等が容易

に可能である。このモーションの選択による成形性向上の効果は、高張力鋼材等の曲げ加工時に発生するスプリングバックの改善^{1,2)}、深絞りの成形性向上にサーボプレスの機能を活用したモーション制御³⁾やパルスモーションを活用した研究⁴⁾が報告されている。本報ではこれらを参考に、SUS304 と同等の NSSC 2120 の角筒成形性向上を検討した結果を報告する。

2. NSSC 2120の成形性

2.1 NSSC 2120 の組成、ミクロ組織及び引張特性

本調査に用いたサンプルは、商用製造された NSSC 2120 (以下、N2120 と示す)、板厚 1.0mm の 2B 製品である。表 1 に代表的な組成を SUS304 と比較して示す。N2120 はレアメタルである Ni, Mo を低減し、オーステナイト相安定化のため N を多く含有している。サンプルの L 断面ミクロ組織を図 1 に示す。図 1 中の灰色部がフェライト相 (α 相)、白色部がオーステナイト相 (γ 相) となる。N2120 のミクロ組織は α 相と γ 相がそれぞれ 50% 程度の二相混合組織を有する組織形態となる。表 2 に N2120 と SUS304 の引張特性を示す。引張試験条件は、JIS Z 2241 条件に準拠し、圧

* 日鉄ステンレス(株) 研究センター 加工技術研究室 研究員 山口県光市島田 3434 〒743-8550

延方向に平行な方向より採取した JIS13 号 B 試験片により測定した。得られた引張特性を比較すると、N2120 は SUS 304 と比較し 0.2% 耐力や引張強さが高く、高強度であるが、低延性となる。図 2 に真応力 - 真ひずみ曲線を示す。SUS 304 は変形に伴う加工誘起マルテンサイト相の生成により加工硬化が継続し、誘起変態塑性 (TRIP) により優れた均一伸びを示す。それに対し N2120 は加工硬化性が小さく、フェライト系ステンレス鋼板とほぼ同等の n 値を示しており、構成相である γ 相の TRIP 効果は生じていない。

2.2 N2120 の成形性

成形性評価試験として、エリクセン値と限界絞り比 (LDR) の評価を実施した。エリクセン試験は JIS Z 2247 B 法に準拠し、しわ押さえ力 10kN、Punch 速度 20mm/min で実施した。LDR 測定では金型を Punch 径 40mm、Die 径 42mm とし、ブランク径 80~90mm まで 2mm 間隔で変化させることで絞り比を変化させた。しわ押さえ力 10kN、

表 1 各鋼種の代表成分
Chemical composition

Material	(mass%)							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	N
NSSC 2120	0.02	0.5	3.2	21.4	2.1	0.6	1.1	0.18
SUS304	0.06	0.4	0.8	18.3	8.6	0.2	0.3	0.04

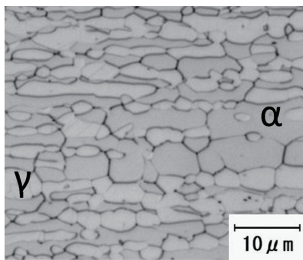


図 1 NSSC 2120 の L 断面マイクロ組織
(α 相: 灰色, γ 相: 白色)
Microstructure of NSSC 2120
(α phase: gray, γ phase: white)

表 2 各鋼種の引張特性
Mechanical properties of material

Material	thick-ness (mm)	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	n-value	r-value average
NSSC 2120	1.0	601	793	29.9	0.19	0.76
SUS304	1.0	324	694	51.7	0.43	0.98

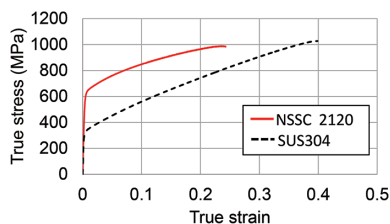


図 2 真応力 - 真ひずみ曲線
True stress - true strain curve

Punch 速度 20mm/min で絞り抜けるまで Punch を移動させた。LDR は、絞り抜け可能な最大のブランク径を Punch 径で除した値とした。測定結果を表 3 に示す。低延性となる N2120 は SUS304 と比較し、エリクセン値は低くなる。深絞り性を示す LDR は SUS304 と同等の値となる。

3. サーボプレス機を活用した成形方法の開発

3.1 試験方法

プレス成形性評価には角筒形状を選択した。角筒成形性は絞り成形と張り出し成形が混在した成形であり、材料の加工特性を見極める有効な手段と考えたためである。プレス試験機にはモーションを自由に設定できるサーボプレス機 (アイダエンジニアリング製 DFS-N1-1500) を用いた。表 4 に本試験で用いた金型寸法及びブランク形状を示す。供試材は N2120, SUS304 の板厚 1.0mm 材を用い、ブランクサイズは 170mm の正方形でコーナーカット 30mm である。潤滑はジョンソンワックス #122 を薄く塗布した。なお、成形品のひずみ量測定に画像解析を用いたため、表面のマーカー保護を目的に供試材にはポリ塩化ビニル (PVC) シートを両面貼り付けている。

表 5 に成形条件を、図 3 にサーボモーションをそれぞれ示す。サーボモーションは 2 種類設定し、成形高さ 50mm の角筒成形性評価を実施した。spm は 1 分間に Punch が往復する回数を、ステップモーションはプレス成形中に設定した高さでモーションを一時停止させ、設定時間後のプレスを再開させるモーションを示している。ステップ条件は、下死点位置より 20mm 位置で 1.0 秒の停止時間と設定した。

表 3 加工特性値
Forming properties

Material	Er-value (mm)	LDR
NSSC 2120	10.3	2.05
SUS304	12.4	2.05

表 4 金型寸法及びブランク形状
Mold dimensions and blank shape

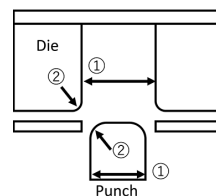
(a) Mold dimensions

	① Size	② Shoulder radius	③ Corner radius
Punch	70×70 mm	8 mm	10 mm
Die	72×72 mm	6 mm	11 mm

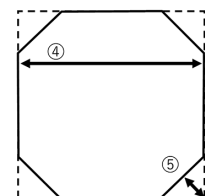
(b) Blank shape and lubrication condition

	④ Size	⑤ Corner cut	Lubrication condition
Blank	170×170 mm	30 mm	PVC sheet + Johnson wax

(c) Mold



(d) Blank



プレス成形実施後の評価方法は外観観察による成形割れ有無の判定, Punch 荷重の推移, 形状比較, 板厚分布, ひずみ解析を行った。三次元形状測定はスキャナー型三次元形状測定器(キーエンス製 VL-300)を用いて 3D モデルを取得し, 形状比較を行った。板厚は超音波板厚測定器(オリパス製 MG45)で測定を行った。ひずみ分布の測定は画像相関法(GOM 製 ARGUS)を用い算出した。

3.1.1 クランクモーションでの角筒成形性

表 6 にクランクモーションでの各鋼種のプレス成形結果を, 図 4 にプレス成形したサンプル外観を示す。N2120 は成形高さ 30mm で割れが発生したが, SUS304 は 50mm 高さまで成形可能であった。N2120 の割れは, 図 4 中央の拡大写真に示されるように Die R 部より 10mm 高さ位置より直辺部とコーナー部のフランジ部境界に向かって進展して

表 5 サーボモーション設定値
Parameter of servo motion

Material	Servo motion	Spm	Real spm	Step		BHF (kN)
		number/min	number/min	Step position (mm)	Step time (s)	
NSSC 2120	Crank	5	5	-	-	150
	Step	5	3	20	1.0	150
SUS304	Crank	5	5	-	-	150

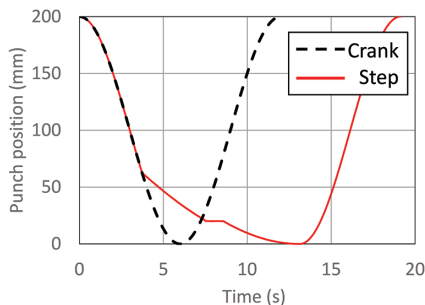


図 3 サーボモーション
Servo motion

表 6 プレス試験結果
Results of press test

Material	Servo motion	Results	Cracking position
NSSC 2120	Crank	No good	Bottom of corner
SUS304	Crank	Good	No crack

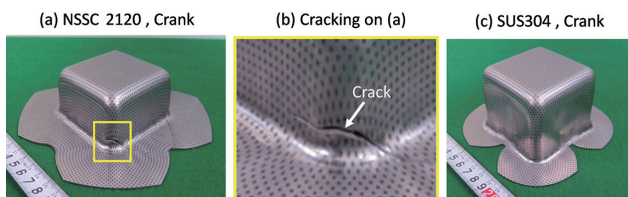


図 4 クランクモーションによるプレスサンプル外観
Press sample of crank motion

いる。この N2120 の割れ形態はウォールブレイクと一致している。

3.1.2 ステップモーションでの角筒成形性

表 7 にステップモーションによるプレス成形結果を, 図 5 に成形したサンプル外観を示す。ステップモーションの適用により割れなく 50mm の成形が可能となり, SUS304 と同等の成形高さが得られることが確認できた。

3.2 サーボモーションによる成形性への効果

3.2.1 Punch 荷重推移

図 6 にクランクモーションとステップモーションを用いてプレス試験した際の Punch 荷重変化を示す。クランクモーションとステップモーションの最大荷重はおおよそ一致している。モーションによる荷重変化として次の 2 点を確認された。1 つ目はモーション停止中の荷重低下である。2 つ目はモーション再開直後に荷重値が増加し, クランクモーションの荷重よりも高くなる点である。これらの現象は応力緩和効果として同様の報告がなされている⁹⁾。

3.2.2 3D 形状比較結果

三次元形状測定はスキャナー型三次元形状測定器を用いてプレスサンプルの外観を全周撮影し, 得られた位置情報

表 7 プレス試験結果
Results of press test

Material	Servo motion	Results	Cracking position
NSSC 2120	Crank	No good	Corner of bottom
	Step	Good	No crack

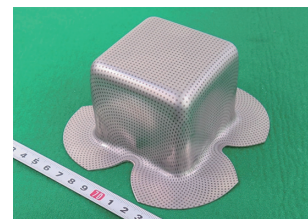


図 5 ステップモーションによるプレスサンプル外観
Press sample of step motion

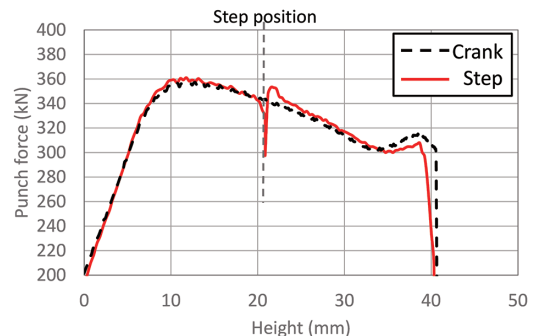


図 6 Punch 荷重推移
History of punch force

より 3D モデルを作成した。基準面を Punch 側の平面として位置合わせし、高さ差分を視覚化することで形状比較評価を行った。

図 7 にクランクモーションとステップモーションの 3D 形状比較結果及び断面形状比較を示す。ステップモーションの形状を基準とし、赤色部は成形品外側への変形(凸部)、青色部は成形品内側への変形(凹部)を示す。直辺部、コーナー部ともに側壁上部では凸形状となり、側壁下部では凹形状となっていることが確認できる。コーナー部と直辺部を比較すると直辺部の変化が大きくなっている。コーナー部の断面形状を形状差分として図 7 (b) で確認すると、コーナー部の形状変化は上部が凸形状で下部が凹形状の S 字状になっており、クランクモーションのほうがステップモーションより材料流入が多く、側壁部で材料が余っている。

3.2.3 板厚測定結果

板厚測定は超音波板厚測定器を用いて非破壊測定を実施した。Punch R 部を原点とし、測定ピッチ 5mm でコーナー部と直辺部の 2 箇所を測定した。

板厚測定結果を図 8 に示す。コーナー部の板厚は、Punch

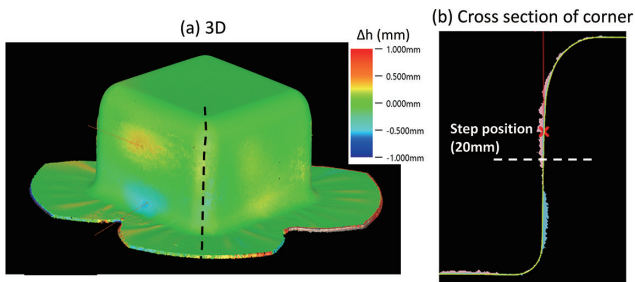


図 7 三次元形状と断面形状比較結果
Shape comparison results of 3D and cross section of corner

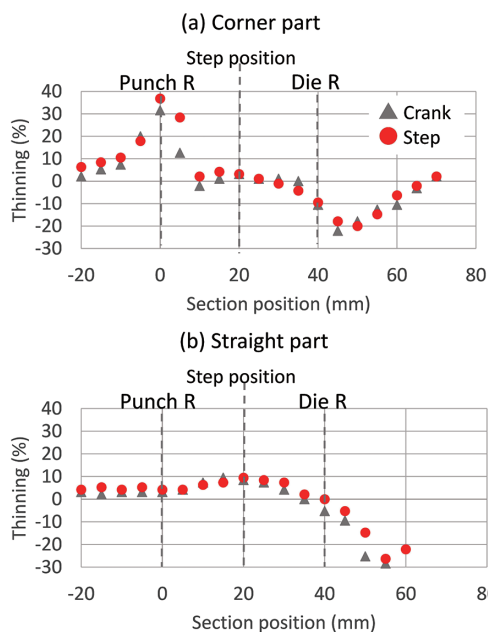


図 8 板厚減少率
Distribution of thinning

R 部近傍ではステップモーションのほうがクランクモーションよりも板厚減少が大きくなっている。対して直辺フランジ部の板厚は、クランクモーションのほうがステップモーションよりも厚い。モーションの違いによる板厚差が顕著であった部位は、コーナー Punch R 部と直辺フランジ部である。前項で確認された形状の差と板厚分布は、同様の傾向を示していると考えられる。例えば、コーナー部で S 字形状を示したクランクモーション材では、材料流入が促進されたため張り出し変形が軽減され板厚減少が抑制されている。

3.2.4 ひずみ分布測定結果

ひずみ分布の測定は画像相関法を用い算出した。成形前のサンプル表面にφ1mmのドット模様を1mm間隔で配列し、プレス成形を実施した。プレスサンプルのドット模様の位置を画像解析し、プレス前後の位置変化量を計測することでひずみ量に換算した。

図 9 にコーナー部のひずみ解析結果を比較して示す。ひずみはモーションに依らずコーナー部にのみ発生している。モーションによる差はひずみ量に明確な差として認められ、クランクモーションではひずみ量が多く集中した領域が確認できる。ひずみが集中した領域は逆 V 型の形態を示している。図 10 にコーナー中央部のひずみ量を比較して示す。Punch R 部においてステップモーションのひずみ量がクランクモーションよりも多いことが明確であり、板厚測定結

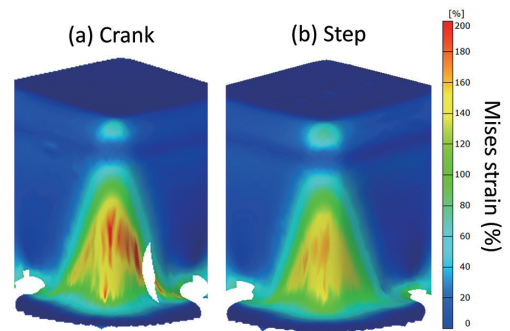


図 9 ミーゼスひずみ分布図
Mises strain distribution map

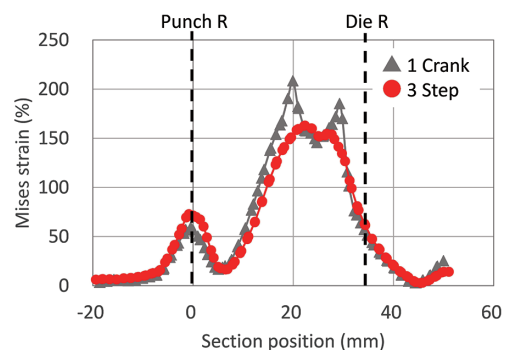


図 10 コーナー部のミーゼスひずみ
History of Mises strain on corner

果と一致している。最もひずみ量が多い箇所はコーナー側壁部の Punch R 部から 20mm 付近であり、ステップモーションのひずみ量と比較するとその差は明らかである。このひずみ分布からも、クランクモーションにおける N2120 の割れはウォールブレイクであるといえる。

4. サーボモーション適用による角筒成形性向上

サーボモーションの適正化により薄板の成形性が向上する研究報告⁶⁾があり、再潤滑や応力緩和によるひずみ分散の効果が挙げられている。本角筒成形試験のクランクモーションで発生した割れは、前述したようにその特徴からウォールブレイクと推定される。ウォールブレイクは、直辺部とコーナー部の材料流入量に顕著な差が発生し、その流入量の差が最も大きくなる箇所でせん断ひずみによる割れが生じると考えられている⁷⁾。図 9 のひずみ量測定結果からも明らかのように、ひずみが集中した領域は逆 V 字となっており、ウォールブレイクに観察される割れ形状に類似している。ウォールブレイクが発生した原因としては、ブランク材のコーナーカットによりコーナー部の材料流入が促進された点、直辺部中央の材料流入が顕著でフランジで流入速度の差が大きくなった点が挙げられる。

対して、割れが発生しなかったステップモーションは、クランクモーション材と同様に逆 V 字形状にひずみが発生しているものの集中領域は発生していない。ステップモーションによってひずみ分布が変化した要因としては、停止時に材料に生じるスプリングバックの効果と考えられる。図 11 にステップモーション前後の Punch 荷重変化を拡大して示す。Punch 荷重は停止に伴い低下しモーション再開直後に顕著な荷重の増加が確認され、その後クランクモーションと同様の荷重となっている。この荷重低下は、材料がスプリングバックにより変形することで生じたと考えられる。この変形により高ひずみ箇所が移動し、ひずみの分散につながっている。また、モーション再開時の荷重増加は、材料のスプリングバックにより新たな箇所で加工硬化が生じたためと考えられる。また、ステップモーション材のほうがクランクモーション材よりも成形形状が良好でありリストライクの効果も発生している。

以上の結果から、ステップモーションにより成形性が向上した要因として、

- 1) モーション停止時のスプリングバックにより、
 - ①直辺部は顕著な材料の流れ込みが起る
 - ②コーナー部は張力を緩和するため材料が流入するが拘束により移動量は僅かとなる
- 2) モーション再開時は、
 - ③直辺部は過剰な流入による肉余りを解消するため変形が

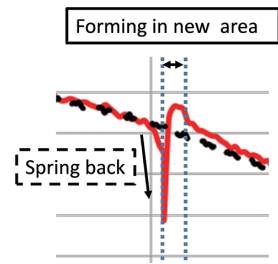


図 11 ステップモーション前後の Punch 荷重
Punch force before and after step motion

促進する

- ④コーナー部はひずみ集中箇所が僅かに移動し、変形を再開する
- ⑤直辺部とコーナー部の材料流入量の差が小さくなり、ウォールブレイクを回避したと推定される。

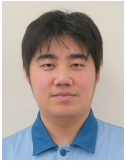
5. 結 言

サーボプレスを活用した NSSC 2120 の角筒成形性を向上させる成形方法の開発に取り組み、以下の知見が得られた。

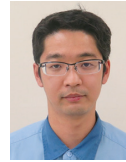
- (1) NSSC 2120 は、0.2%耐力が 600MPa、破断伸びは 30% であり、SUS304 に比べ高強度低延性の引張特性を示している。
- (2) 加工特性としては、r 値が 0.78 と低いものの限界絞り比 LDR は 2.05 と SUS304 と同等の値を示している。
- (3) SUS304 と同じ成形条件としたクランクモーションの角筒成形試験において、NSSC 2120 では、ウォールブレイクが発生した。
- (4) ステップモーションで成形することで NSSC 2120 の角筒成形性は向上し、SUS304 と同等の成形高さを得ることが可能になる。
- (5) ステップモーションによる成形性の向上は、モーション停止時のスプリングバック起因の変形により材料流入速度が緩和されたためと考えられる。

参照文献

- 1) 久野拓律 ほか：型技術. 27 (10), 28 (2012)
- 2) 澄川智史 ほか：塑性と加工. 61 (710), 1 (2020)
- 3) 玉井良清 ほか：塑性と加工. 50 (587), 15 (2009)
- 4) 西村尚 ほか：塑性と加工. 50 (586), 14 (2009)
- 5) 久野拓律 ほか：平成 24 年塑性加工春季講演会講演論文集. 2012, p.117
- 6) 山下裕之 ほか：Honda R&D Technical Review. 24 (1), 142 (2012)
- 7) 岡本豊彦 ほか：塑性と加工. 7 (70), 584 (1966)



櫻庭拓也 Takuya SAKURABA
日鉄ステンレス(株)
研究センター 加工技術研究室
研究員
山口県光市島田3434 〒743-8550



川 真知 Masatomo KAWA
日鉄ステンレス(株)
研究センター 厚板・棒線材料研究部
主幹研究員



石丸詠一郎 Eiichiro ISHIMARU
日鉄ステンレス(株)
研究センター 加工技術研究室
室長(部長) 工博