

JFE443CT ステンレス鋼板の最適成形技術

Forming Technologies Optimized for JFE443CT Stainless Steel Sheets

井口 貴朗 IGUCHI Takaaki JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部 主任研究員(副部長)
尾崎 芳宏 OZAKI Yoshihiro JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部 主任研究員(課長)

要旨

JFE443CT はフェライト系ステンレスであり、汎用的なオーステナイト系ステンレス鋼板と比較して機械的特性が大きく異なる。加工に当たっては絞り性に優れる特性を生かし、成形を張出しよりも絞り中心にするのが適切である。さらにスプリングバック特性、打ち抜き性もオーステナイト系とは異なるので、それに合わせた最適加工条件を選定する必要がある。穴広げ性は優れている。加工条件を適正化すれば高度な加工も可能となり、SUS304 の代替鋼種として製品のコストダウンに貢献できる。

Abstract:

JFE443CT, as newly developed grade of ferritic stainless steel sheets has mechanical properties which are significantly different from those of austenitic stainless steel sheets. Forming should be designed in such a way that drawing is dominant rather than stretching. Spring-back behavior varies according to the bending radius. Optimal clearance in blanking is smaller. Expandability is higher. JFE443CT can be formed into highly complex shapes by taking the above properties into account and optimizing the forming conditions, then it contribute to cost reduction of products as a substitution of TYPE304 austenitic stainless steel.

1. はじめに

SUS430 (16%Cr) に代表される従来のフェライト系ステンレス鋼板は、SUS304 (18%Cr-8%Ni) に代表されるオーステナイト系ステンレス鋼板に比べて、安価ではあるが耐食性に劣り、かつ加工性も低いという評価があった。しかし、最近では JFE443CT (21%Cr-0.4%Cu-0.3%Ti)¹⁾ のような SUS304 と遜色ない耐食性を備えたフェライト系鋼板が普及してきており、折からの Ni 資源価格の高騰という環境のなかでは、オーステナイト系からフェライト系材料への置換が有力なコストダウン手法として拡大しつつある。

しかしながら、従来オーステナイト系材料で加工していた部品を、そのままの工具・工程で JFE443CT のようなフェライト系材料を用いて加工すると、困難に直面することがある。それは両者が本質的に結晶構造の違いからくる加工特性の大きな違いを有しているためであり、特にそれは延性能の違いとなって現れる。その点、JFE443CT は SUS430 よりは改善されているが、SUS304 などと比較するとまだ大きな差がある。

しかし、加工に問題があるからといってフェライト系材

料のコストダウンメリットを放棄する必要はない。その材料の基本的加工特性をよく理解し、それに適した加工方法および条件を選択し、場合によっては部品形状の設計にも工夫を行うことによって、フェライト系材料でも十分に複雑な加工が可能である。

本論文は、上記のような最適工程設計に資することを目的として、JFE443CT と SUS304 の比較を中心としながら基本的な材料の加工特性について述べる。さらに、具体的な加工事例について、材料特性の違いを生かした加工方法、条件の最適な設計指針について言及する。

2. 材料の機械的特性と加工性

2.1 JFE443CT の基礎特性と SUS304 との比較

2.1.1 引張特性

図 1 に JFE443CT 0.8 t 冷延板の引張試験時の応力-ひずみ曲線を、SUS304 のそれと比較して示す。表 1 に引張試験結果より得られる特性値の比較も示す。SUS304 は加工誘起変態により著しく高い加工硬化特性を示し、結果として引張強度が高く、伸び値が 50%以上と非常に高い特性を示すが、フェライト組織からなる JFE443CT は、他の SUS430 などのフェライト系ステンレスと同様に、加工硬化は小さく、引張強度が低くなり、伸び値は 30%強程度であ

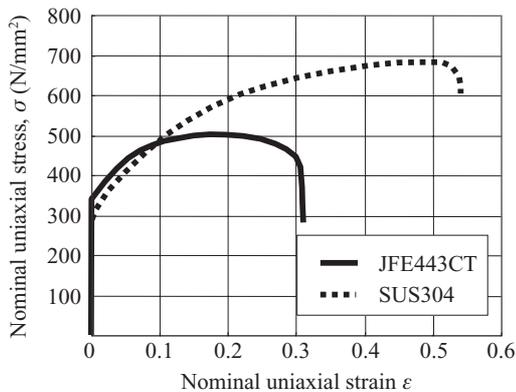


図1 JFE443CTの単軸引張試験結果とSUS304との比較 (板厚0.8mm, JIS13B試験片)

Fig.1 Comparison of uniaxial tensile test result of JFE443CT with that of TYPE304 (by JIS13B specimen of 0.8 mm thickness)

表1 機械的特性の比較(*音響法による測定値)

Table 1 Mechanical properties (*Measured by acoustic method)

Grade	0.2%YS (N/mm ²)	TS (N/mm ²)	El (%)	\bar{r}	E (GPa)
JFE443CT	305	483	31	1.3	204
SUS430	320	490	29	1.0	200
SUS304	260	645	60	1.0	193

YS: Yield strength at 0.2% strain

TS: Tensile strength

EL: Elongation

\bar{r} : Average Lankford value

E: Young's modulus*

る。ただし、初期降伏応力はJFE443CTの方が高い傾向にある。したがって、応力-ひずみ曲線は、ひずみが0.1より小さい領域で交差する。(ただし、実際には初期降伏強度のバラツキにより、交差しない場合も発生する。)

材料の異方性を表すランクフォード値 (r 値) に関しては、3方向の平均 \bar{r} 値で見ると、SUS304が $\bar{r} = 1.0$ であるのに対し、JFE443CTは $\bar{r} = 1.3$ と高く、絞り成形に有利な特性となっている。

2.1.2 絞り、張出し特性

写真1に限界絞り比 (LDR)²⁾ を求める試験を行った結果を示す。このような純粋な絞り加工では、JFE443CTはSUS304よりも加工限界が高い。これは、JFE443CTの方が加工硬化が小さく、 r 値が高いためにフランジの絞り抵抗が縦壁強度に対して小さいことが理由である。

写真2にエリクセン試験³⁾ による球頭張出し試験結果を示す。このような純粋な張出し加工では、加工性は材料の伸び値でほぼ決定される。JFE443CTは伸び値がSUS304の約半分程度と低いため、張出し加工性は劣る。

写真3にコニカルカップ試験⁴⁾ (CCV) 結果を示す。この試験は絞り、張出し複合成形性を表すが、JFE443CTのそれはSUS304とほぼ同等である。

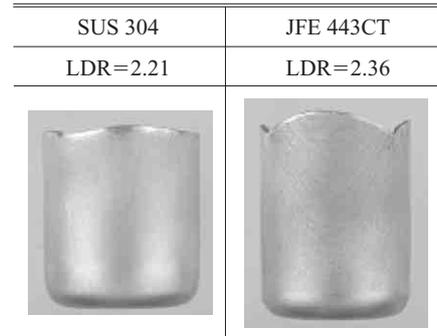


写真1 LDR (限界絞り比) の比較

Photo 1 Comparison of limiting drawing ratios (Thickness of specimen: 0.8 mm, Punch diameter: 33 mm, Punch: Not lubricated, Die: Lubricated by plastic sheet)

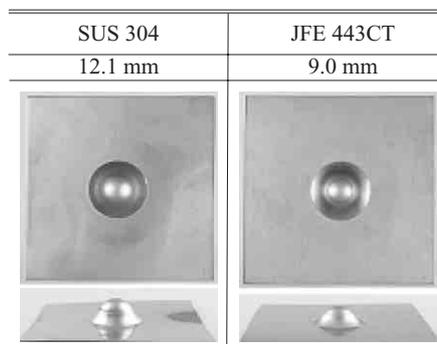


写真2 エリクセン張出し試験結果の比較

Photo 2 Comparison of Erichsen test results (Thickness of specimen: 0.8 mm, Lubrication: Graphite grease, Punch diameter: 20 mm)

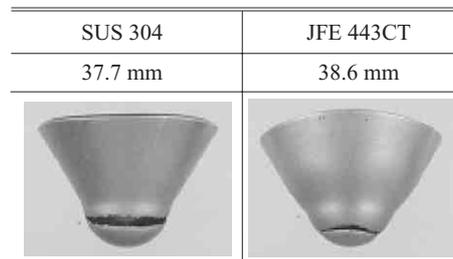


写真3 コニカルカップ試験結果の比較

Photo 3 Comparison of conical cup test results (Thickness of specimen: 0.8 mm, Lubrication: Machine oil, Punch diameter: 17 mm)

2.1.3 密着曲げ特性

1.5 mm材の180°密着曲げ試験時の、曲げ部断面観察結果を写真4に示す。JFE443CTではSUS304と同様に180°曲げは問題なく可能である。ただし、厳しい曲げの場合、外表面に微細な凹凸が発生して肌荒れ(白化)が発生することがある。また、内表面は折れこみが発生することがある。これは、JFE443CTの方がSUS304よりも結晶粒径が大きいこと、自由表面に不均一起因の凹凸が発生しやすいこと、および加工硬化が小さいため、ひずみが局部に集中しやすいことによる。ただし、加工硬化が小さいことから、

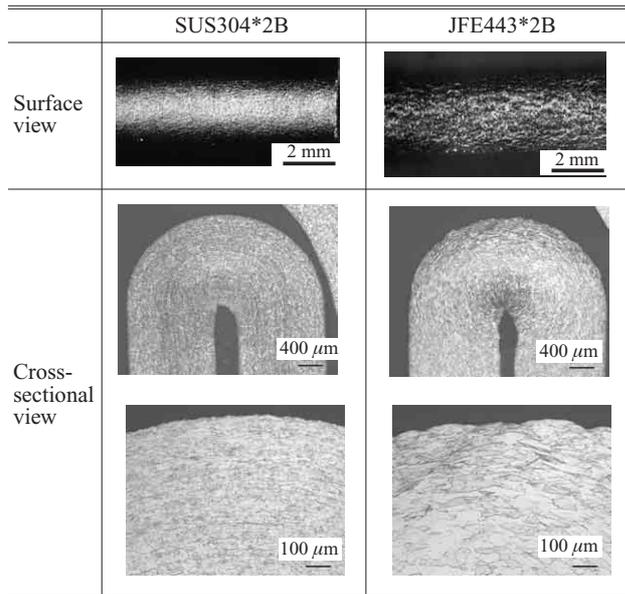


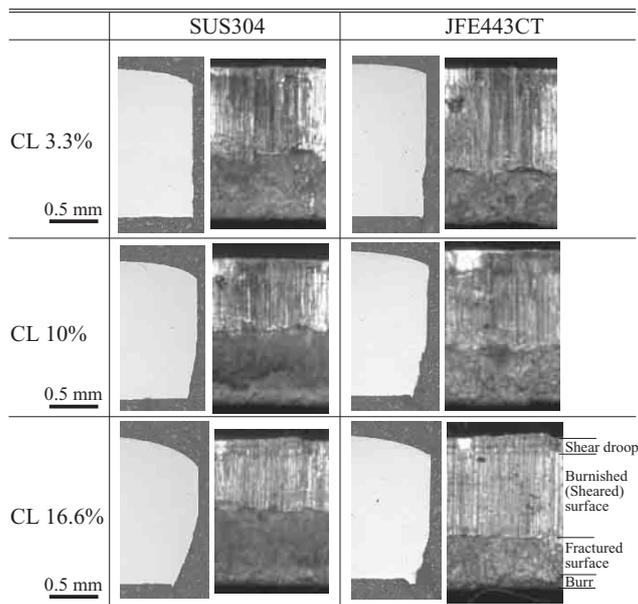
写真4 密着曲げ試験結果

Photo 4 Comparison of hemming test results (Thickness of specimen: 1.5 mm)

密着度は JFE443CT の方が一般に優れている。

2.1.4 せん断, 打ち抜き特性

写真5にφ5 mm ポンチによる打ち抜き試験後の破面の断面ならびに外観を、ポンチとダイスのクリアランス別に示す。同じクリアランスで比較すると、JFE443CTの方が SUS304 に比較してせん断面率が大きく、破断面比率が小さい。図2は打ち抜きクリアランスとせん断面率の比較を示したものである。これは図1で示した加工硬化特性の差に起因する。一方、カエリ高さについて見ると、JFE



CL: Clearance ratio to thickness

写真5 打ち抜き試験結果の比較

Photo 5 Comparison of punching test results (Thickness of specimen: 1.5 mm, Punch diameter 5 mm)

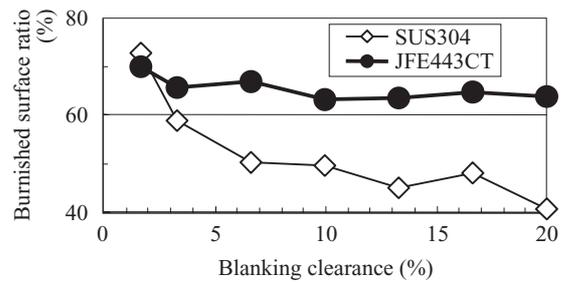


図2 打ち抜きクリアランスとせん断面比率の関係

Fig.2 Relationship between blanking clearance ratio and burnished surface ratio (Thickness of specimen: 1.5 mm, Punch diameter: 10 mm)

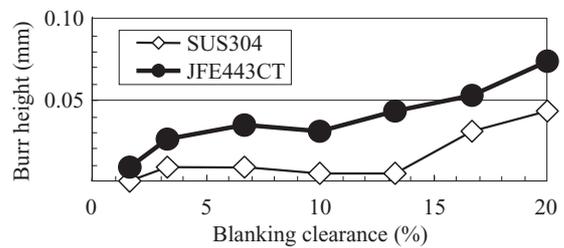


図3 打ち抜きクリアランスとカエリ高さの関係

Fig.3 Relationship between blanking clearance and burr height (Thickness of specimen: 1.5 mm, Punch diameter: 10 mm)

443CTの方が大きい。図3は打ち抜きクリアランスとカエリ高さの関係を示す。SUS304の場合はクリアランス10%近傍にカエリ高さゼロとなる条件があるが、JFE443CTの場合はカエリ高さが全体に高く、カエリなしとするためにはクリアランスを最小限にする必要がある。これも図1に示した加工硬化特性の差に起因し、特にJFE443CTは局部伸びが大きく、SUS304は局部伸びが小さいことに起因し、これが材料の破断分離の際の挙動の違いとなって現れると考えられる。

2.1.4 穴広げ特性

φ10 ポンチを用いて穴を打ち抜き、それを穴広げして穴広げ性λ値を求める試験⁵⁾を行った結果を図4に示す。JFE443CTのλ値は約200%で、SUS304は50%程度であることに比べて優れている。さらに、通常のSUS430の100%前後であるのに比べても優れている。この理由は、特にSUS304は加工誘起変態によって、加工後の組織が硬軟2層化し、不均一となってせん断面の不整が割れに敏感に作用するため、穴広げ性が低いことによる。またJFE443CTが同じフェライト単相のSUS430よりも穴広げ性に優れる理由は、より高純度化したことによって局部延性能が向上しているためである。

2.1.5 スプリングバック特性

90°型曲げを行い、離型後のスプリングバック量を見た結果を写真6に示す。試験結果は曲げ部のR寸法によって正反対の結果を示す。R=100と大きな曲率の曲げの場合、

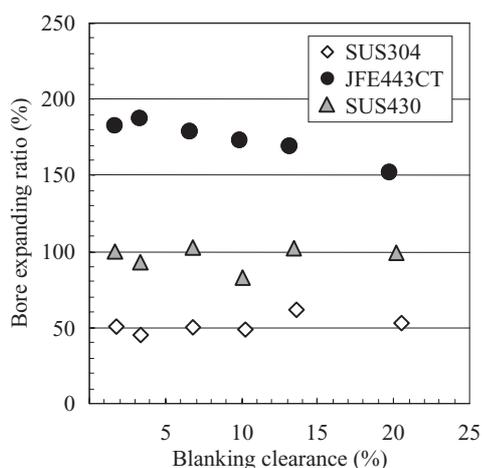


図4 打ち抜きクリアランスと穴広げ率の関係

Fig. 4 Relationship between punching clearance and bore expanding ratio (Thickness of specimen: 1.5 mm, Punch diameter: 10 mm)

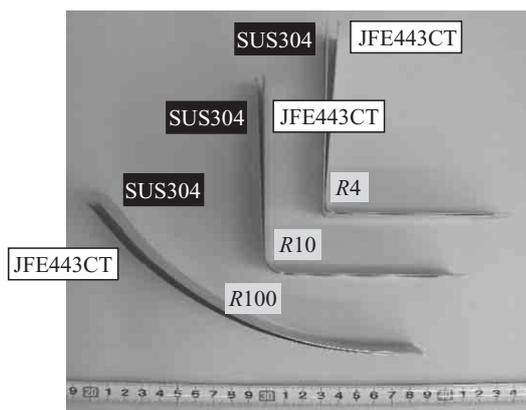


写真6 スプリングバック量の比較

Photo 6 Comparison of springback (Thickness of specimen: 0.8 mm)

JFE443CTのスプリングバック量はSUS304に比べて大きい。 $R = 10$ や $R = 4$ と小さな曲率の曲げの場合はSUS304の方が大きい。スプリングバック量は、加工終了時点での材料強度とヤング率の比に比例する。曲げ曲率が大きい場合はひずみ量が小さく、図1に示すようにひずみが小さい領域でJFE443CTの降伏応力が高い範囲となるので、スプリングバック量が大きくなる。一方で曲げ曲率が小さい場合は、SUS304の方が降伏応力が高くなるので、スプリングバック量は逆転する。

2.1.6 多段成形特性

8工程の円筒絞りで絞り比5.6という高ひずみ加工を行った結果を写真7に示す。JFE443CTとSUS304では、両材とも最終段階まで加工が可能であった。ただし、SUS304では加工の数時間後に図に示すような置き割れ(時期割れ)が発生した。置き割れはオーステナイト系材料に特有の現象である。フェライト系であるJFE443CTでは起こらない。またこのような加工に影響を与える因子は、大ひずみ域での延性または加工硬化性と二次加工脆性と考えられる。こ

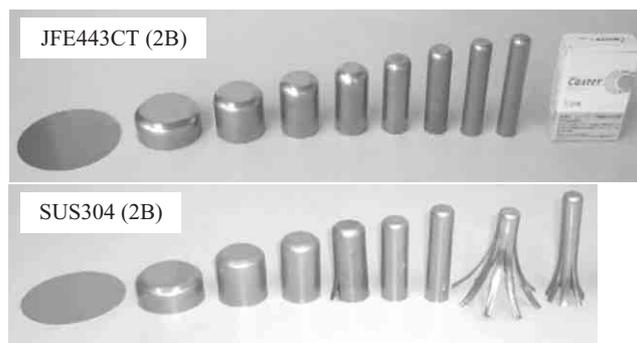


写真7 8段再絞り結果の比較

Photo 7 Comparison of results of multi-pass redrawing (Thickness of specimen: 0.8 mm, Drawing ratio: 5.6)

の点でSUS304は劣っているわけではないが、加工後の置き割れの可能性を考慮するとフェライト系材料を選択することが有利である。JFE443CTは高純度化材料であるため、このような用途に有利である。

2.1.7 JFE443CTの加工性まとめ

前節で述べたJFE443CTのSUS304と比較した加工特性の優劣と、それに対応した加工の際の方針を以下にまとめる。

- (1) 絞り特性に優れ、張出し特性に劣る。
- (2) 加工硬化が小さい。
- (3) ひずみが局所的に集中しやすい。
- (4) 曲げなどで肌荒れ(白化)しやすい。
- (5) せん断打ち抜き時のカエリが大きい。
- (6) 穴広げ特性は非常に優れている。
- (7) 大 R 曲げではスプリングバックが大きい。
- (8) 小 R 曲げではスプリングバックが小さい。
- (9) 大ひずみ加工でも置き割れが発生しない。

2.2 JFE443CTの加工指針

2-1節で述べたJFE443CTの特性より、そのプレス加工工程の設計に当たっては、以下の事項に留意する必要がある。

- (1) 張り出さず、絞りで成形する。穴広げも活用する。

すなわち、

- (i) 絞りビードやしわ押さえ圧力を、しわの出ない範囲でできるだけ小さくし、フランジからの肉の流入量を多くする。
- (ii) 張出し部の潤滑性を良くし、ひずみの集中を防ぐ。
- (iii) ブランクの大きさは最小にし、余肉を落とした異形ブランクとする。
- (iv) まず、おおまかな(角 R の大きい)形状を成形して肉寄せし、次いで仕上成形で形を出す。
- (v) 複雑形状ではプレス段数は多くし、部分ごとに成形する。
- (vi) 中心部の形から外側の形の順に成形する。
- (vii) ネジ台座などの張出部の中央に穴あけするような

場合は、先に穴をあけてから張出し（穴広げ）する。
 (2) せん断、打ち抜きクリアランスは設備精度を考慮した最小限とする。刃先の曲率 R も小さくする。この場合、型の精度管理が問題になるが、一方で JFE443CT は加工硬化が小さいことから打ち抜き荷重が小さく、型磨耗も少ないという利点もある。

(3) 曲げ加工時の角度見込みを調節する。

成形する曲げ R によってスプリングバック角度が 2.1.4 節で示したように変化するので、見込み角を調節する必要がある。既設の型で型曲げする場合は、型の改修が必要である。

3. 加工事例

3.1 深絞り製品

写真 8 に示すような単純な深絞り品は、加工性の観点からは JFE443CT の最も得意とする分野である。最適な絞り条件は SUS304 の場合とは異なるが、図 5 に示すような有限要素法によるシミュレーションを事前に行えば、部品形状や加工条件の最適化がより効率的に行える。ただし、深絞りにおいて、フランジからの流入量を多くすると、縦壁部の平坦度が悪い場合があるので、リストライク（仕上げプレス）で若干の張り出しを与えることが必要な場合がある。このリストライクによる張出しの際は、ひずみ量をおおむね 5% 以内に収める必要がある。



写真 8 JFE443CT 絞り製品の例
 Photo 8 Example of drawn product of JFE443CT

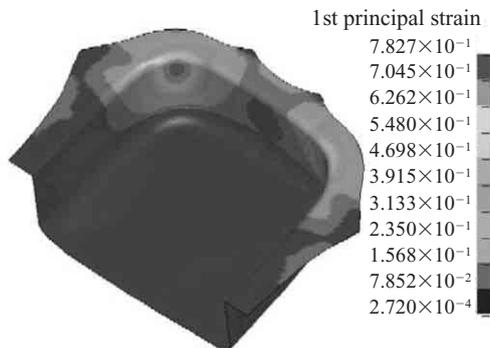


図 5 深絞り製品の成形シミュレーション
 Fig. 5 Forming simulation of deep drawing

フェライト系ステンレス共通の問題点として、深絞り時にリジングと呼ばれる筋模様が発生する問題があるが、JFE443CT では低リジング化改善を進めた結果⁶⁾、現在は問題は解消されている。

3.2 多段成形、穴広げ部品

写真 9 に家電製品の部品の一例を示す。本製品は部材の一部に高い張出し部を形成し、さらにその部分を穴あけ穴広げ、かつ縦壁にしごきを加えて口状部を形成したものである。その工程の状況を図 6 に示す。本加工の要点は図 6 の 1~4 工程の張出し成形において割れを防ぐ型設計である。ここでは図に示すように多段成形を用いてなだらかな山型から順次円筒状に成形する設計に加えて、張出し部の位置を設計上許される範囲で周辺部に配置させ、絞り要素を高める工夫をした。この詳細の設計にも有限要素法を用いたシミュレーションが有効であった。この張出しが成功した後、次の穴広げは問題なく成形できた。



写真 9 絞り、穴広げ加工品の例
 Photo 9 Example of stamped part by drawing and expanding

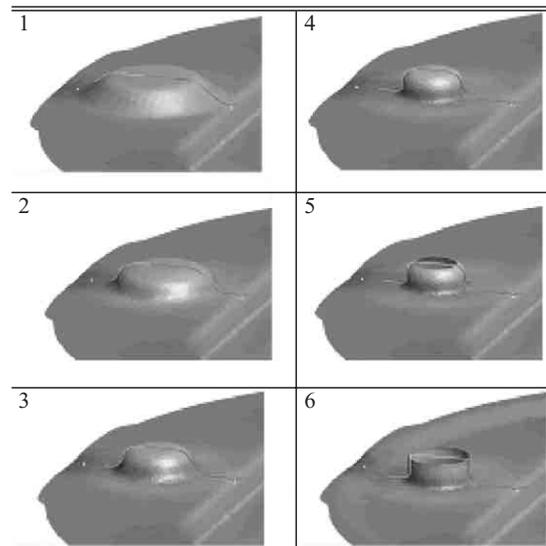


図 6 加工工程のシミュレーション結果
 Fig. 6 Result of numerical simulation of forming process

4. おわりに

JFE443CTは、汎用のステンレス鋼である SUS304 に対するコストダウンを計れる代替鋼種として有力であるが、フェライト系鋼種であることから成形性に違いがある。本報告では、その優位点、劣位点を明らかにし、それに応じた最適加工をする方法について整理した。本技術を踏まえれば、JFE443CTを用いて非常に高度な加工が可能であることを、実例とともに示した。

それらの技術によって、JFE443CTはすでに多方面で使用され、あるいは SUS304 からの置き換えに活用されている。

参考文献

- 1) 石井和秀, 石井知洋, 太田裕樹. JFE 技報. no.20, p.10.

- 2) Swift, H.W. Sheet Metal Industries. vol. 31, 1954, p. 817.
- 3) JIS Z 2247.
- 4) JIS Z 2243.
- 5) 日本鉄鋼連盟規格. JFS T1001-1996 穴広げ試験方法.
- 6) 塩川隆, 矢沢好弘, 岡田修二. JFE 技報. no.20, p.22.

協力：松下電器産業（株）殿



井口 貴朗



尾崎 芳宏