

エキゾーストマニフォールド用 フェライト系ステンレス鋼の成形性

Formability of the Ferritic Stainless Steel for Exhaust Manifold

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)
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)
宇城 工 UJIRO Takumi JFE スチール スチール研究所 ステンレス鋼研究部長・工博

要旨

自動車の排気温の高温化により、排気系部品の素材であるフェライト系ステンレス鋼は高耐熱化が進む一方で、高強度となり成形加工には従来とは異なる技術が必要になってきている。また、エキゾーストマニフォールドやその周辺部品の形状は複雑化してきている。これら素材および部品形状の要因のため部品加工の困難性は高まり、重要な問題として意識されるようになってきた。エキゾーストマニフォールド用フェライト系ステンレス鋼の使用には、その加工性を理解することが重要である。本報告では、エキゾーストマニフォールド部品に関するプレス成形、二次加工脆化、パイプ曲げの事例についてフェライト系ステンレス鋼の加工性の特徴をまとめ、適正な素材選定、部品設計、部品加工のための指針を示す。

Abstract:

Ferritic stainless steel is used widely for automotive exhaust systems. The higher the temperature of exhaust gas becomes, the more strongly the heat resistance properties are required for the ferritic stainless steel for exhaust manifold. The improved material in heat resistance, leads to have less formability, requires additional forming techniques in return. On the other hand, the parts are designed more and more complicatedly in these days. So the difficulties in forming such complex shaped parts becomes to be discussed as an important issue. To resolve the problems and to use the ferritic stainless steel rightly, it is important to understand its formability. This paper gives some examples related to the formability in press forming, secondary-work-embrittlement, and pipe bending, and provides some useful information for an optimum choice of material, parts design, and forming.

1. はじめに

環境問題意識の高まりとともに自動車の燃費向上と排ガスの浄化が求められるようになり、対策として排気ガス温度の高温化が積極的に進められている。その結果、エキゾーストマニフォールド（以下、エキマニ）をはじめとする排気系部品に使用されるフェライト系ステンレス鋼にはより高い耐熱性が要求されるようになってきた。JFE スチールではこのような要求に適合するため耐高温酸化特性、耐高温疲労特性、耐熱疲労特性に代表される耐熱性を重視して開発されたエキマニ用途向け鋼種を揃えている。一方でエキマニは限られたスペースに配置する必要性ばかりでなく、拘束率を介して熱疲労耐久性にも形状が影響を及ぼすため、複雑に設計され成形難度の高い部品になる傾向があ

る。このため最近では耐熱性に加えて加工性にも配慮して材料開発されている¹⁻⁶⁾。このような背景のもとで、エキマニ用ステンレス鋼の使用に際してはその成形性を把握し、加工方法を最適化することが重要になってきている。表 1

表 1 エキマニ用フェライト系ステンレス鋼の機械的特性
Table 1 Mechanical properties of ferritic stainless steel for exhaust manifold

	0.2%PS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	<i>n</i> -value	<i>r</i> -value
JFE409L	230	385	39	0.23	1.2
JFE429EX	290	470	36	0.22	1.4
JFE430LNM	280	470	36	0.22	1.2
JFE-MH1	310	480	36	0.20	1.4
JFE434LN2	365	525	33	0.20	1.2
JFE-WX1	360	530	32	0.20	1.1

PS: Proof stress TS: Tensile strength
El: Elongation *n*-value: Work hardening coefficient
r-value: Lankford value

2008 年 1 月 15 日受付

には代表的なエキマニ用ステンレス鋼についてその機械的特性の例を示す。

2. プレス成形性

2.1 プレス成形での延性割れ

2.1.1 成形限界曲線

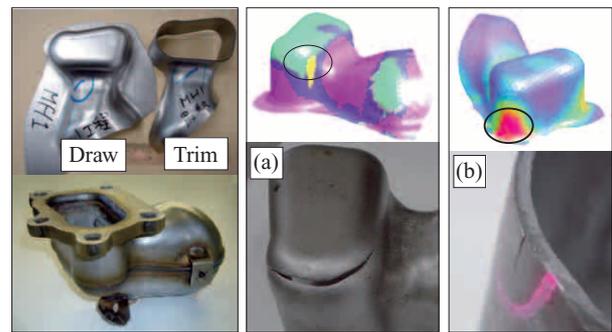
排気系部品には板材からプレス成形する部品も少なくない。表1に示した、いわゆる引張り試験から得られる機械的特性は材料の加工性を表す最も基本的な指標であり、これらは部品の設計、素材選定、成形加工の場面で常に考慮される。しかしながらプレス成形時の板材の変形は複雑であり、成形過程で特定の部位に材料の破断を生じることがある。このような不具合の発生を一軸の引張試験の結果である機械的特性から予測するのは困難である。

板材のプレス成形での割れ発生予測には成形限界線図が役立つ⁷⁾。成形限界線図とはさまざまなひずみ比の変形に対し板材の破断限界を2次元座標(変形状態図)上で表したものである。実際の成形品で測定したひずみを成形限界線図と比較することで破断までの余裕度を判定できる。図1には各種のエキマニ用フェライト系ステンレス鋼の成形限界線図を示す。ひずみのない未加工の状態を原点とし、最小主ひずみ $\epsilon_2 > 0$ の領域が張出し成形に代表されるような板面内のいずれの方向にも伸ばされた(伸び-伸び)変形に対応する。一方、 $\epsilon_2 < 0$ の領域は絞り成形に代表され、板面内である方向に伸ばされつつ、直行する方向には縮む(伸び-縮み)変形に対応する。また $\epsilon_2 \approx 0$ の変形は平面ひずみと呼ばれる。図1から分かるように、成形限界線は素材により異なり、原点から離れているほど(図1では上方にあるほど)、破断を生じるまでの限界が大きい。

2.1.2 成形シミュレーションの活用

図2にはターボセルの写真を示す。ターボチャージャー

はエキマニ直下からの排ガスを還流させるため使用温度は高く、エキマニと同様の高耐熱性が必要とされる。ここではエキマニ用フェライト系ステンレス鋼であるJFE-MH1を使用した例である。図のとおり複雑な形状であり、このような部品をどのように成形するかは部品加工メーカーの経験に負うところであり、その製造コストをも考慮したうえでの工程設計の判断は必ずしも容易ではない。最近ではシミュレーション技術の進歩も目覚しく、このような成形の可否判断に活用されるようになってきた。図3はターボセルについての成形シミュレーションで得られたひずみの様子を変形状態図に表したものである。素材の成形限界線も併せて示し、プレス加工での割れ危険性を判断した。部位(a)ではひずみが成形限界線に近づき、割れ発生までの余裕が少ないことが分かる。部位(a)では実際のプレス加工の現場でも割れが発生したが、同じくシミュレーションを用いブランク形状の最適化により割れを回避できた。シミュレーションでは不具合を予測するだけでなく、形状変更や金型修正の効果を確認でき、複雑形状部品の成形工程の最適化や、開発に要する期間と費用の削減に有効である。



協力：(株)ユーメックス殿

図2 プレス部品外観とシミュレーション計算によるひずみ分布

Fig.2 Example of press formed parts and calculated strain distribution

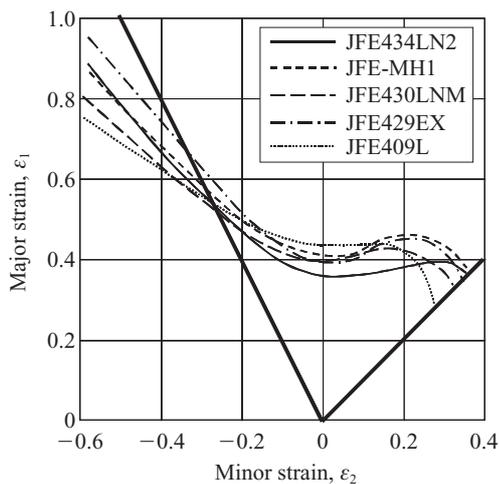
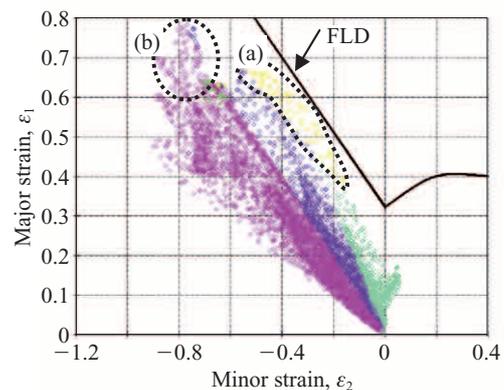


図1 エキマニ用フェライト系ステンレス鋼の成形限界線図

Fig.1 Forming limit diagram of ferritic stainless steel for exhaust manifold



協力：(株)ユーメックス殿

図3 シミュレーション計算による変形状態図

Fig.3 Calculated forming limit diagram of press formed parts

2.2 プレス成形での脆性割れ

2.2.1 二次加工脆化割れ

フェライト系ステンレス鋼では深絞り加工（一次加工）した後、さらに加工（二次加工）しようとした場合や、もしくは衝撃力が加えられた場合には二次加工脆化割れと呼ばれる脆性割れが起こることがある。その典型として円筒絞り品の胴部や角筒絞り品のコーナー部など著しい縮み変形を受けた部分が脆化し成形方向に沿って割れることから一般に縦割れともよばれる^{7,8)}。これに類似の脆化割れ現象としてSUS304などのオーステナイト系ステンレス鋼での時期割れがあるが、準安定オーステナイト相の加工誘起によるオーステナイト(γ) \rightarrow マルテンサイト(α')変態に関係すると考えられており、本質的な発生機構は異なる。写真1には円筒絞り品での脆化割れの事例を示す。二次加工脆化割れはIF鋼、低炭素鋼や高張力鋼などの普通鋼板では、深絞り成形の絞り比に依存すると報告されているが、その起こりやすさは加工前の母材の靱性を必ずしも反映しないとされ^{9,10)}、このことが部品の設計および素材選定の判断を困難にする一因といえる。フェライト系ステンレス鋼での報告は少ないが、低C、N化およびTi、Nb添加によるIF化に加えて、プレス技術の進歩により深絞り加工が可能になったことで顕在化してきた不具合現象である。発生には温度依存性があり、特に気温が低下する冬季に発生することが多い。また、絞り成形部のため顕著な板厚減少もなく危険箇所を認識しにくいので注意が必要である。前出の図2に示した部位(b)は多工程に及ぶ成形の途中で衝撃の影響を受けた二次加工脆化割れの例である。シミュレーションの結果から、この部分は著しい絞り成形状態であることが分かる。しかしながら、二次加工脆化割れの発生は先に述べた成形限界線図では予測できない。この部品の製造においては、成形の前半でブランクや途中形状を修正することで加工ひずみを低く抑え、後半では低温、高速での加工を避けるなどの対策により二次加工脆化割れが回避された。

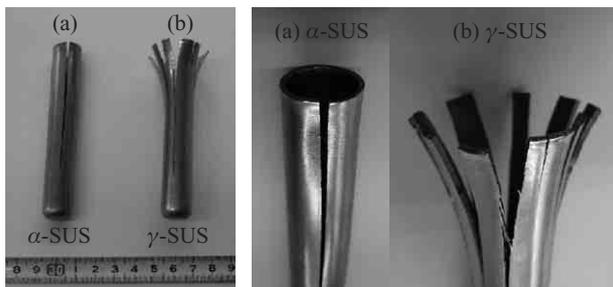


写真1 ステンレス鋼の加工脆化割れ ((a) 二次加工脆化割れ (フェライト系ステンレス鋼), (b) 時期割れ (オーステナイト系ステンレス鋼))

Photo 1 Examples of brittle fracture of stainless steel ((a) Secondary-work-embrittlement crack (ferritic stainless steel), (b) Season crack (austenitic stainless steel))

2.2.2 二次加工脆化割れ性の試験

2.0 mmのエキマニ用ステンレス鋼板を供試材とし二次加工脆化割れの起きやすさの比較試験を実施した。図4に試験方法の概略を示す。供試材を $\phi 67$ mmのブランクに打ち抜き3回の絞り加工により、円筒カップ形状に成形した。このときの絞り加工サイズは1次絞りは外径 $\phi 38$ mm (平底パンチ径 $\phi 33$ mm)、2次絞りは外径 $\phi 32$ mm (球頭パンチ $\phi 27$ mm)、および3次絞りは外径 $\phi 24.2$ mm (球頭パンチ $\phi 19.4$ mm)とした。カップ胴部の異なる位置よりひずみ量の異なるサンプルを採取しテストピースとした。カップ胴部のひずみ分布は成形前のブランクに記したケガキ位置を、成形後の位置と対応づけることであらかじめ求めた。このテストピースに重さ5 kgの平底形状の錘を高さ800 mmから落下させ、テストピースが塑性変形して潰れるか、脆性割れを起こすかを種々の温度で判定した。塑性変形から脆性割れに転じる温度を延性脆性遷移温度として求めた。図5には試験により得られた塑性ひずみ量と延性脆性遷移温度の関係を示す。テストピースに付与された塑性ひずみ量が多いほど延性脆性遷移温度は高くなることが分かる。すなわち一次加工で厳しい絞り加工をされるほど、二次加工脆化割れを起こしやすくなり、場合により室温であっても衝撃を受けて割れを生じる可能性がある。鋼種で比較すると、より高合金で強度レベルの高いJFE-WX1ではJFE-MH1に比べて同じひずみ量でも延性脆性遷移温度は20~30℃程度も上昇する。

以上より深絞りなど材料が縮み変形する加工では二次加

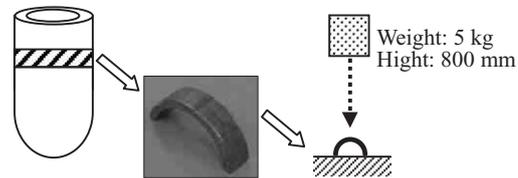


図4 二次加工脆化の遷移温度評価試験の方法

Fig.4 Schematic illustration of evaluation method of transition temperature for secondary-work-embrittlement

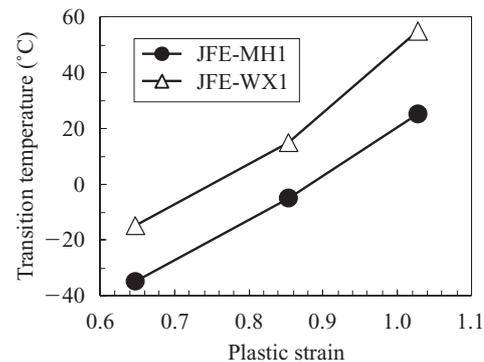


図5 延性脆性遷移温度と塑性ひずみ量の関係

Fig.5 Relationship between the transition temperature for secondary-work-embrittlement and plastic strain of draw formed specimen

工脆化割れに注意が必要なが分かる。加工における対策として中間焼鈍が極めて有効であるが、それができない場合には二次加工工程の低温化を避け、加工速度を小さくするなどの対策がとられる。素材の観点では低合金で軟質な材料を選定することが好ましく、また高 r 値化 (r 値：ランクフォード値) や、微量のB添加も二次加工脆化割れの抑制対策として効果がある。

3. パイプの曲げ加工性

3.1 パイプエキマニの曲げ加工方法

エキマニはエンジン各気筒からの排ガスを集合させフロントパイプに導く。排気系部品の中でも最上流に位置し最も高耐熱性が要求される部品でもある。加工法としては、最近では板材からプレス成形し溶接で組みあがるプレスエキマニも使われるようになってきたが、主流としては曲げ加工したパイプをエンジンの各気筒に配置して集合させる、いわゆるパイプエキマニといえる。エキマニ用のパイプ曲げ加工の特徴としてはエンジン周りの限られたスペースに収め、かつ拘束率や排気効率をも考慮して複雑に曲げ加工されることがあげられ、場合によっては部品の最小板厚の保証を要する。パイプの曲げ加工の種類は多く¹¹⁾、最近では加工性、生産性とも優れた新しい曲げ加工方法が報告されている¹²⁾。中でも現在エキマニ用のパイプ曲げ加工法として普及しているのは図6に模式的に示す回転引き曲げ法であり、比較的小半径の曲げと、複雑な多段曲げが可能で、さらにはブースターやワイパーにより板厚減少とシワの抑制が可能との観点から多く採用されている^{12~14)}。

3.2 曲げパイプの板厚分布

回転引き曲げによるパイプの曲げ加工では一般的に外周側の板厚が減少し、その板厚減少が著しい場合には割れを生じる。割れを生じない場合でも板厚が保証値を下回らないように留意が必要になる。ここでは回転引き曲げによるパイプの180°曲げ加工の例を示す。素管にはJFE409L、 $\phi 50.1 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm}$ を用いた。図7には事前検討として

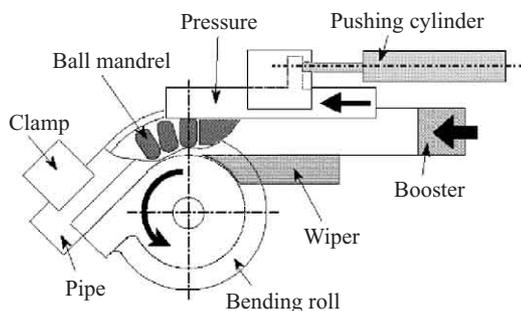
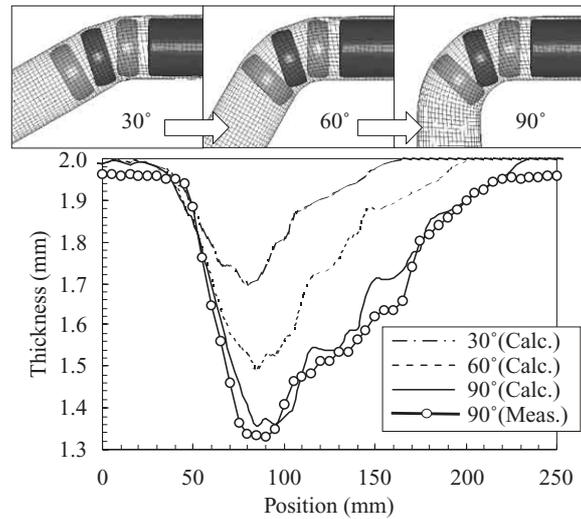


図6 回転引き曲げ加工方法の概略

Fig.6 Schematic diagram of rotary draw bending



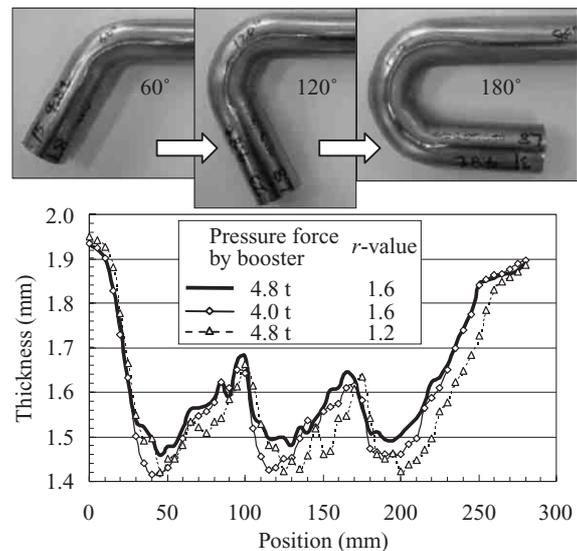
協力：(株)本田技術研究所殿

図7 回転引き曲げによる曲げ部の板厚分布

Fig.7 Thickness distribution after bending in rotary draw bending

90°曲げ加工をした場合の曲げ外周の板厚分布の測定結果を示す。シミュレーションにより得られた途中の30°、60°曲げ時点の板厚分布も合わせて示している。曲げ加工の進行にともない板厚減少が進むが、最小板厚の箇所は移動は小さく、曲げ開始点の付近にあることが分かる。またこの結果から180°曲げを行う場合には90°ずつ2回曲げて180°とするよりも60°ずつ3回曲げの方が板厚減少が少ないことが予想された。

シミュレーションでの予想に基づき60°ずつ3回曲げ加工したパイプの外観と板厚分布の測定結果を図8に示す。



協力：(株)本田技術研究所殿

図8 回転引き曲げによる180°曲げ部の板厚分布
ブースター軸押し荷重および素管 r 値の変化による影響

Fig.8 Effect of pressure force by booster, and r -value of raw pipe material on thickness distribution after 180° bending in rotary draw bending

3回に分割した曲げに対応して板厚減少の箇所が3ヶ所に分かれて現れている。また図8には回転引き曲げの軸押し荷重、および素管の r 値を変更した場合の比較も示す。軸押し荷重が大きい方が、また素管の r 値が高い方が曲げ外周部の板厚減少は抑えられることが分かる。

4. おわりに

以上のエキマニ用フェライト系ステンレス鋼の加工事例より、次のような加工上の注意点が明確化された。

- (1) プレス成形での複雑な変形に対し破断を予測するには成形限界線図が必要である。さらに最近では成形シミュレーションを併せて活用することで、破断の予測だけでなくプレス工程設計の最適化、迅速化が期待できる。
- (2) 深絞りのような著しい縮み成形をした場合には二次加工脆化割れに注意が必要である。その発生しやすさはひずみ量や温度に依存し、材料によっても異なる。これを回避するためには一次加工のひずみを低く抑えるほか、二次加工工程では低温化を避け、低速で加工することが有効である。
- (3) パイプの回転引き曲げ加工での板厚減少の抑制には、小角度に分割曲げ、軸押し荷重の増大、高 r 値素材の使用が有効である。

エキマニなど自動車排気系部品の加工上の問題は他にも数多くあるが、材料選定や部品設計の段階から耐熱性、耐食性に併せて、材料の成形性、成形方法にも考慮することが重要といえる。

参考文献

- 1) 加藤康, 宮崎淳, 笠茂利広, 宇城工. 自動車技術会学術講演会前刷集.

- 2007, no. 145, p. 9.
- 2) 宮崎淳, 平沢淳一郎, 古君修. JFE 技報. 2004, no. 4, p. 53.
- 3) 宮崎淳, 平沢淳一郎, 古君修, 小林眞, 柿原節雄. まてりあ. 2003, vol. 42, no. 2, p. 157.
- 4) 宮崎淳, 平沢淳一郎, 古君修. 川崎製鉄技報. 2002, vol. 34, no. 2, p. 81.
- 5) 宮崎淳, 平沢淳一郎, 古君修. 自動車技術. 2001, vol. 55, no. 10, p. 25.
- 6) 郡司牧男, 宮崎淳, 豊岡高明. 川崎製鉄技報. 2001, vol. 33, no. 4, p. 165.
- 7) 薄鋼板成形技術研究会編. 「プレス成形難易ハンドブック第3版」. 2007, p. 31-238.
- 8) ステンレス協会編. 「ステンレス便覧第3版」. 日刊工業新聞社. 1995, p. 925-972.
- 9) 松藤和夫, 大沢紘一, 酒匂雅隆, 下村隆良, 由田征史. 塑性と加工. 1980, vol. 21, no. 237, p. 890.
- 10) 松藤和夫, 大沢紘一, 由田征史, 酒匂雅隆. 日本鋼管技報. 1976, no. 70, p. 1.
- 11) 日本塑性学会編. チューブフォーミング. コロナ社. 1992, p. 36-64.
- 12) 鈴木孝司, 豊田俊介, 佐藤昭夫, 上野行一, 岡田正雄. JFE 技報. 2007, no. 17, p. 52.
- 13) 橋本裕二, 鈴木孝司, 豊田俊介, 郡司牧男, 佐藤昭夫. 2004年度塑性加工学会春季講演大会論文. 2004, p. 291.
- 14) 橋本裕二, 園部修, 鈴木孝司, 河端良和, 郡司牧男, 佐藤昭夫. 2006年度塑性加工学会秋季講演大会論文. 2006.



尾崎 芳宏



井口 貴朗



宇城 工