

# サスペンション，シャシー部品用高強度鋼管 軽量化ニーズに貢献する高加工性鋼管と加工技術

## High Strength Steel Tubes for Automotive Suspension Parts —High Strength Steel Tubes with Excellent Formability and Forming Technology for Light Weight Automobiles—

豊田 俊介 TOYODA Shunsuke JFE スチール スチール研究所 鋼管・鋳物研究部 主任研究員(課長)  
鈴木 孝司 SUZUKI Koji JFE スチール スチール研究所 薄板加工技術研究部 主任研究員(部長)・工博  
佐藤 昭夫 SATO Akio JFE スチール 知多製造所 商品技術部 兼 鋼管セクター部 主任部員(副部長)

### 要旨

自動車の軽量化による環境保全と衝突安全性確保のための高剛性化のニーズに応える鋼管素材として高強度鋼管の開発に取組み、従来 540 MPa 級までの採用であった足回り部品素材として 780 MPa 級電縫鋼管と 780 MPa 級 HISTORY 鋼管の開発・商品化に成功した。開発鋼管は優れた成形性に加え、良好な疲労特性、衝撃特性、塗装適合性、材質安定性を有している。高強度鋼管を用いた実際の部材形状・加工工程設計においては、素材技術に加え鋼管二次加工技術、性能評価技術が不可欠である。このような加工技術の一環として、曲げ、口絞り、液圧加工における加工条件と素材特性の影響を報告する。

### Abstract:

JFE Steel has developed two kinds of 780 MPa class steel tubes for automotive suspension parts. They have excellent formability, fatigue endurance, toughness and paintability. In addition to the material development, tube forming and its evaluation techniques are also important for applying high strength steel tubes to actual parts. The effects of forming conditions and mechanical properties on formability in bending, swaging and hydroforming are also discussed.

## 1. 緒言

溶接鋼管は、軽量・高剛性の閉断面素材としてチューブ  
ハイドロフォーミング技術などの加工技術の進展にとも  
ない、サブフレームなど自動車構造部材へ採用される事例  
が増えている。JFE スチールではこのようなニーズに応え  
るべく Fig. 1 に示すように素材・商品開発，鋼管 2 次加  
工技術，性能評価技術を有機的に連携させた取組みを進め  
ており、高加工性電縫鋼管<sup>1)</sup>，縮径圧延による組織制御  
技術を利用した HISTORY (high speed tube welding and  
optimum reducing technology) 鋼管<sup>2-4)</sup> など特長ある鋼管  
を開発するとともに、部材に適合した加工技術<sup>5)</sup>，数値解  
析技術<sup>6)</sup> を提供している。特に最近、低燃費化，運動性  
能のさらなる向上の観点から、サスペンションアームや  
トーションビームなどの足回り部品用として成形性の良  
好な高強度鋼管の開発ニーズが高まっている。本報では  
こうした背景からサスペンション，シャシー部品用として  
開発した引張強度 (TS) 780 MPa 級の電縫鋼管と

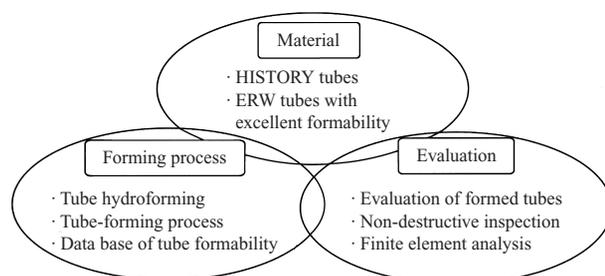


Fig. 1 Schematic description of correlated development items for tube applications to automotive structural parts

780 MPa 級 HISTORY 鋼管について、その優れた成形性と  
実用特性を報告する。さらに、こうした高強度鋼管を用い  
た部材形状・成形工程設計の際に必要な加工技術に関  
する知見として、曲げ、口絞り、液圧加工における加工条  
件と素材特性の影響について報告する。

## 2. 780 MPa 級電縫鋼管

サスペンション，シャシー部品用鋼管では、成形性に加

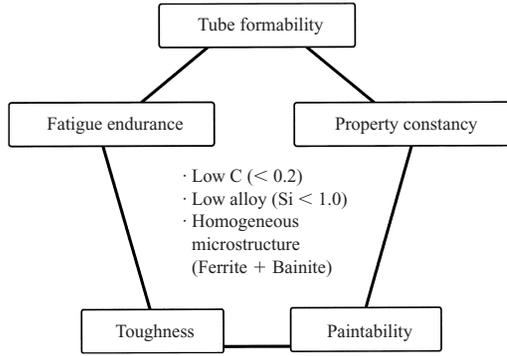


Fig. 2 Concept of developed 780 MPa ERW steel tubes

え、疲労特性、衝撃特性、塗装適合性、材質安定性などの実用特性が重視される。当社では、成形性や実用特性に及ぼす冶金学的因子を明らかにし、サスペンションアーム用の780 MPa級電縫鋼管を開発した。この鋼管は、製鋼での炉外精錬による高純度化技術、熱間圧延における高精度制御冷却技術、造管での高精度電縫部オンライン熱処理技術を駆使して、鋼管素材の化学組成とミクロ組織を最適化することにより製造される。Fig. 2に開発鋼管の材質設計の考え方を示す。

高強度薄板においては、マルテンサイトや残留オーステナイトなどの硬質相とフェライトの複合組織が強度・成形性バランスが良好とされている<sup>7)</sup>。これに対し、本鋼管素材ではフェライト、ベイナイトを主体とした構成相間の硬度差のより小さい組織とすることで、造管ひずみの軟質相への集中を回避し、部品成形に求められる  $\rho < 2D$  ( $\rho$ : 中立軸曲げ半径  $D$ : 管外径) の曲げ加工可能な優れた延性を得ている。このような均質組織化は、複合組織化に必要なとされる Si などの元素低減などととも、優れた疲労特性、衝撃特性、塗装適合性、材質安定性確保にも寄与している。

### 3. 780 MPa 級 HISTORY 鋼管

当社は、さらに高い成形性が必要とされる部品用として780 MPa 級 HISTORY 鋼管を開発した。Fig. 3に590–780 MPa 級鋼管の強度と延性の関係を示す。780 MPa 級

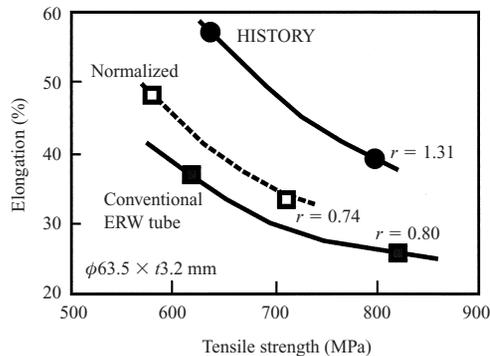


Fig. 3 TS-El balance and  $r$ -value of 780 MPa HISTORY

HISTORY 鋼管は従来の圧延ままの電縫鋼管や熱処理電縫鋼管に比べ、高い伸びと  $r$  値を示す。これは縮径圧延による組織の微細均質化と、鋼管縮径圧延特有の集合組織形成によるものと考えられる<sup>3)</sup>。このような高い伸びと  $r$  値を有する HISTORY 鋼管は、曲げ加工時の減肉が小さく、曲げ部の静的強度、疲労強度についても良好な特性が期待できる。780 MPa 級 HISTORY 鋼管では前述の780 MPa 級電縫鋼管と同様、低 C 量とした成分系で、均質微細組織とすることにより、衝撃特性、塗装適合性などの実用特性を確保し、さらに寸法精度を考慮した製造方法を採用している。

### 4. 780 MPa 級開発鋼管の実用特性

#### 4.1 疲労特性

780 MPa 級開発鋼管の疲労特性を4点曲げ疲労試験により評価した。Fig. 4に示すように780 MPa 級電縫鋼管 HISTORY 鋼管ともに  $2 \times 10^6$  サイクル疲労強度 / 引張強度  $\cong 0.8$  の高い疲労強度を示す。HISTORY 鋼管が造管ひずみによるYS上昇がないにもかかわらず高い疲労特性を示すのは、加工硬化能が高く、耐亀裂伝播性に優れるためと考えられる。

HISTORY 鋼管では縮径圧延前の加熱により電縫部と母材部の材質が均質化される。一方、780 MPa 級電縫鋼管では、電縫部のオンライン熱処理により電縫部と母材部の材質均一化を図っている。780 MPa 級電縫鋼管から円周方向に展開し採取した母材部と電縫部の疲労試験片を用いて応力比 ( $R$ ) = -1、繰返し速度 25 Hz の完全両振り条件で平面曲げ疲労試験を行った。Fig. 5に示すように、電縫部においても母材と同等の良好な疲労強度が確保されている。

780 MPa 電縫鋼管と780 MPa 級 HISTORY 鋼管について、足回り部品の組立てを想定した条件でアーク溶接を施し、溶接部の特性を評価した。アーク溶接部には実用上問

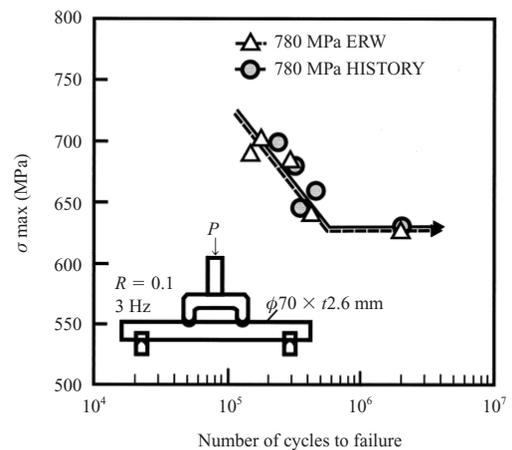


Fig. 4 Fatigue endurance ( $S-N$ ) curves of developed 780 MPa ERW steel tube and 780 MPa HISTORY in 4-point bending fatigue test

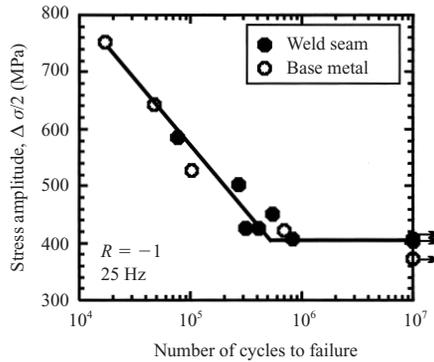


Fig. 5 Fatigue endurance (S-N) curves of weld seam and base metal in 780 MPa ERW steel tube

題となる軟化は認められず疲労特性は良好であった。溶接継手部の静的引張試験においても破断位置は母材であり強度が確保されていた。

#### 4.2 衝撃特性

サスペンション、シャシー部材では衝突時などの衝撃的な外力に対する抵抗力が求められる。開発鋼管はいずれも、C量を抑制するなど成分、ミクロ組織の適正制御により衝撃特性、低温韌性を確保している。展開して採取した1/4サイズ2mm Vノッチシャルピー試験片により衝撃特性を評価した。いずれの鋼管も、L、C方向ともに0における吸収エネルギーが120 J/cm<sup>2</sup>以上、破面遷移温度-70以下の良好な衝撃特性、低温韌性を示した。

#### 4.3 塗装適合性

780 MPa級開発鋼管はいずれも、Siなどの合金元素を低減した成分系、均質微細組織とすることにより良好な塗装適合性を確保している。化成処理性、耐水密着性の評価と塩水噴霧試験を文献<sup>8)</sup>に準じた条件で行い、370 MPa級電縫鋼管と比較した(Table 1)。リン酸亜鉛鉄結晶観察、着塗装・塩水噴霧試験後のプリスター幅測定により、780 MPa級の開発鋼管はいずれも370 MPa級電縫鋼管と同程度と良好な化成処理性、耐水密着性、塗装後耐食性を有することを確認した。

#### 4.4 材質安定性

サスペンション、シャシー部品用鋼管では形状凍結性

Table 1 Paintability of 780 MPa ERW steel tube and 780 MPa HISTORY

Grade	Phosphatability	Wet adhesion*	Corrosion resistance** (ED***: 10 μm)
780 MPa ERW	○	○	○
780 MPa HISTORY	○	○	○
STKM13A	○	○	○

\* 40°C, 500 h, \*\* 5%NaCl-35°C, 480 h, \*\*\* With cross cut, ○: Good

部材機能確保の観点から材質安定性が求められる。780 MPa級電縫鋼管では、熱間圧延における高精度制御冷却技術などにより高成形性780 MPa級熱間圧延鋼板NANOハイテン<sup>9)</sup>と同程度の安定した材質特性を確保している。780 MPa級HISTORY鋼管においては、素材化学組成と縮径圧延工程での温度加工条件の高精度制御により材質安定性を確保している。

### 5. 高強度鋼管の加工特性

近年自動車用部品への鋼管の適用が注目されており、特にチューブ hidroforming (THF) に関して適用検討例が多く報告されている<sup>5)</sup>。THFは曲げなどの予成形と液圧成形、さらには高液圧成形下での型なし穴抜き工程を含む複合加工プロセスであるため、さまざまな加工法に対する加工特性の知見が必要である。THFに適用される通常の素材はSTKM11A(290 MPa級)~13B(440 MPa級)が主体であり、この強度水準の自動車用鋼管の成形性は一般に高く、素管の張出し性に関する検討報告も多い<sup>5)</sup>。一方、これを超える高強度鋼管では強度上昇にともない成形性が低下するため、素材の加工特性を考慮した適正な加工条件を選定が重要となる。さらに、加工硬化にともなう強度上昇分を考慮した部品としての機能特性、あるいは加工にともなうしわの影響などについても十分考慮する必要がある。ここでは、これまで報告例の少ない高強度鋼管について、自動車用鋼管の二次加工に多く適用される曲げ口絞り、液圧加工における加工条件と素材特性の影響について報告する。

#### 5.1 曲げ加工特性

自動車用鋼管の曲げ加工には回転引曲げ加工法が多く採用されている。この加工法ではFig. 6に示すようにワイパーによる曲げ内側のしわ防止と、後方推力負荷による曲げ外側の減肉抑制が可能であるため、比較的小さな曲げ半径の加工に適している。中立軸曲げ半径と素管外径の比( $\rho/D$ )に対する曲げ外側の幾何学的な伸びひずみ $\epsilon = (D/2\rho) \times 100$ を計算すると $\rho/D = 2.0$ では $\epsilon = 25\%$ だが $\rho/D = 1.5$ では $\epsilon = 33\%$ 、さらに $\rho/D = 1.0$

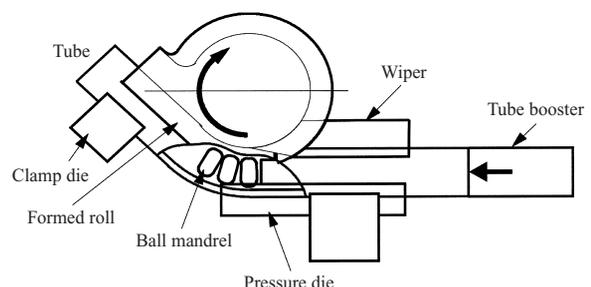


Fig. 6 Schematic illustration of rotary draw bending

Table 2 Rotary draw bendability of steel tubes ( $\phi 63.5 \times t 3.2$  mm)

TS grade (MPa)	Tubes	Bending radius, $\rho/D$			Remarks
		2.0	1.5	1.0	
440	HISTORY	○	○	○	-
	Normalized ERW	○	○	○	-
	As rolled ERW	○	○	○	-
590	HISTORY	○	○	○	-
	Normalized ERW	○	○	○	-
	As rolled ERW	○	○	×	-
780	HISTORY	○	○	×	1.1: ○
	Normalized ERW	○	○	×	1.3: ○
	As rolled ERW	○	△	×	-

○ : Without split, △ : Necked, × : Split

になると  $\varepsilon = 50\%$  に達する。このため、特に曲げ半径が小さい場合、曲げ外側の破断を防止するために、素管の延性確保と加工条件の最適化による減肉抑制が重要となる。

強度水準、履歴の異なる鋼管に対する回転引曲げ試験結果を Table 2 に示す。なお、材質が異なる素材の曲げ加工性を広範に比較できるようにボール式マンドレルに潤滑剤を塗布した。440, 590 MPa 級では、590 MPa 級の圧延ままの電縫鋼管を除き、いずれも中立軸曲げ半径が素管外径 ( $1D$ ) 相当の小さな曲げ半径まで曲げ加工可能であった。780 MPa 級では圧延ままの電縫管で  $1.5D$  程度まで、HISTORY 鋼管においては  $1.1D$  まで、熱処理電縫鋼管は  $1.3D$  までの小半径曲げが可能であった。このような成形限界の差は Fig. 3 との比較から、素材の  $n$  値  $r$  値の差によるものと考えられる<sup>5,6,10,11</sup>。

### 5.2 口絞り加工特性

管材の管端加工において、口絞りおよび口広げ加工は適用頻度の高い加工技術である。このうち口絞り加工方法にはロータリーステージ加工と穴ダイスに素管を押し込む平行ステージ加工<sup>12</sup>がある。これら口絞り加工は、加工時の応力場が圧縮応力主体であるため割れの問題が少なく大きな縮径率を容易に得られることが特長である。平行ステージ加工法では潤滑剤を用いて穴ダイスへの焼き付きを防止しなければならないが、ロータリーステージ加工法と比較して設備が安価で加工時の騒音が少ないため採用される場合が多い。

#### 高強度電縫鋼管の平行ステージ加工実験の結果

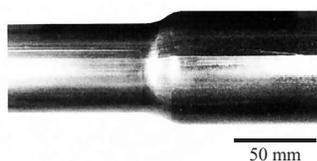


Photo 1 20% swaged 780 MPa ERW steel tube ( $\phi 76.3 \times t 2.9 \rightarrow \phi 60.5$  mm; 1 pass)

780 MPa 級電縫鋼管においても 1 工程で縮径率 20% の加工が可能であった (Photo 1)。なお、HISTORY 鋼管にも同様の平行ステージ加工が可能であることを確認している。HISTORY 鋼管の縮径加工部の増肉率は電縫鋼管より少ない傾向が認められたが、これは HISTORY 鋼管特有の集合組織の影響によるものと考えられる。

### 5.3 液圧加工特性

780 MPa 級 HISTORY 鋼管と、比較材として 690 MPa 級熱処理電縫鋼管の液圧加工試験結果を Table 3 に示す。型のない自由バルジ加工の場合、これら高強度鋼管の限界張出し率は、軸押なし、ありの場合ともに 370 MPa 級電縫鋼管の半分程度であった<sup>13</sup>。一方、張出し率 35%、長方形断面の型バルジ加工では、780 MPa 級 HISTORY 鋼管において、軸押と金型による拘束を活用することにより角部の曲率半径が大きいものの割れやしわを生じずに成形することができた (Photo 2)。型バルジ加工における素管強度と成形終了後の角部曲率半径の関係を Fig. 7 に示す。液圧加工条件一定の場合、成形後の角部曲率半径は素管の  $n$  値  $r$  値によらず強度で整理された。

Table 3 Hydroformability of steel tubes ( $\phi 63.5 \times t 3.2$  mm)

Grade	Expansion limit in free bulge (%)		Expansion results in die cavity*		
	Without axial displacement	With axial displacement	Split	Wrinkle	Hydroformed corner radius (mm)
780 MPa HISTORY	8	35	None	None	18.5
690 MPa normalized	5	23	None	Exist	16.1

\*Maximum expansion ratio: 35%, Axial displacement: 60 mm, Internal pressure: 200 MPa

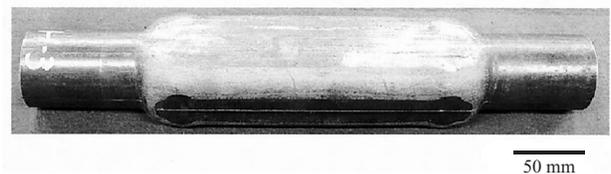


Photo 2 Hydroformed 780 MPa HISTORY in die cavity ( $\phi 63.5 \times t 3.2$  mm  $\rightarrow$  35% expansion)

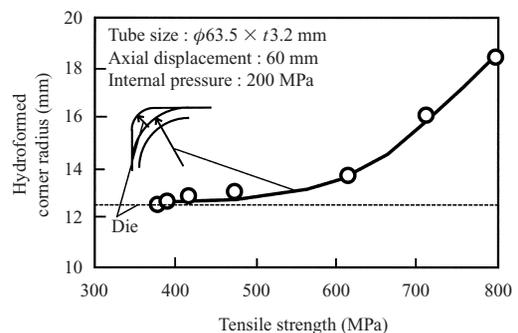


Fig. 7 Effect of tensile strength on hydroformed corner radius in die cavity

## 6. 結言

サスペンション，シャシー部品用として2種類の780 MPa 級鋼管を開発し，その成形性と実用特性を評価した。

- 1) 780 MPa 級電縫鋼管，780 MPa 級 HISTORY 鋼管ともに低C量とした成分系で均質微細組織とすることで曲げ中心半径  $< 2D$  の曲げ加工可能な優れた延性と良好な疲労特性，衝撃特性，塗装適合性を安定的に確保することができた。特に780 MPa 級 HISTORY 鋼管は  $EI \geq 35\%$   $r$  値  $\geq 1.2$  と高い成形特性値を示す。
- 2) 自動車用鋼管の二次加工に多く適用される曲げ，口絞り，液圧加工において，加工条件と素材特性を系統的に変化させた成形試験を行い，780 MPa 級までの高強度鋼管の成形可能範囲を明らかにした。
- 3) これら780 MPa 級開発鋼管は，需要家での評価試験を通して，サスペンションアームなどへ適用可能であることが確認され，実車に採用されている。

JFE スチールは引続き，新たな機能特性と信頼性を有する足回り用高強度鋼管素材・加工技術・数値解析技術の開発を進め，軽量化による環境保全と高剛性化による衝突安全性能確保というニーズに応えていく所存である。

### 参考文献

- 1) Toyoda, S.; Kawabata, Y.; Suzuki, K.; Sakata, K.; Yabumoto, S.; Gunji, M.;

- Sato, A. SAE Technical Paper Series. 2004-01-0829, 2004.
- 2) 豊岡高明，板谷元晶，依藤章．川崎製鉄技報．vol. 33 no. 4 2001 p. 145
- 3) 西森正徳，荒谷昌利，小高幹雄．川崎製鉄技報．vol. 33，no. 4，2001 p. 151
- 4) 河端良和，岡部能知，小山康衛．川崎製鉄技報．vol. 33，no. 4，2001 p. 155
- 5) たとえば鈴木孝司，福村勝，上井清史，豊田俊介，于強，白鳥正樹，森孝男．205 回塑加シンポジウム．2001，p. 51
- 6) Sonobe, O.; Hashimoto, Y.; Toyooka, T.; Abe, H. Proc. 22nd IDDRG. 2002, p. 299.
- 7) 高橋学．ふえらむ．vol. 7，no. 11，2002，p. 870
- 8) 吉武明英，木下正行，大沢紘一，大北智良，大和田浩，堀雅司 NKK 技報．no. 145，1994，p. 9
- 9) 富田邦和，船川義正，塩崎毅，前田英司，山本徹夫．まてりあ vol. 42，no. 1，2003，p. 70
- 10) 森孝男，安田信哉，鈴木孝司，吉武明英．自技会春講論．no. 11-00 2000，p. 1
- 11) 吉田亨，栗山幸久．平 11 塑加連講，1999，p. 447
- 12) 中村正信．パイプ加工法．東京，日刊工業新聞社，1984
- 13) Toyoda, S.; Uwai, K.; Suzuki, K.; Saito, T.; Yoshitake, A.; Mori, T. SAE Technical Paper Series. 1999-01-0027, 1999.



豊田 俊介



鈴木 孝司



佐藤 昭夫