

高機能性自動車用鋼管

High Performance Steel Tubes for Automotive Parts

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)
河端 良和 KAWABATA Yoshikazu 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 鋼管・鋳物研究部 主任研究員(部長)・工博

要旨

JFE スチールは、自動車サスペンション用の優れた疲労特性を有する 2 種類の鋼管を開発した。トーションビームに適用される鋼管は、高疲労強度と優れた成形性、さらに、良好な耐水素脆性を合わせ有するものである。これらの特長は、0.3% 未満の低炭素量を基本とした成分と、熱間圧延における高精度制御圧延・冷却技術によって達成されている。もう一つのスタビライザー用鋼管は、1.5 以上の高 r 値化により疲労特性を向上したものである。このための集合組織は HISTORY プロセスの温間縮径圧延によって得られたもので、曲げ加工時の減肉を抑制して、疲労寿命を改善できる。さらに、JFE スチールは、これらのような素材の開発だけでなく、回転引き曲げ加工における高強度鋼管の加工特性評価や、マンドレルとワイパーのない回転曲げ加工技術を新開発して、自動車サスペンション用部品の鋼管化を進めている。

Abstract:

JFE Steel has newly developed two kinds of steel tubes having excellent fatigue endurance for automotive suspension parts. The tube employed to torsion beam has an excellent combination of fatigue endurance, hydro-formability and delayed fracture resistance. These properties can be obtained by the low C (less than 0.3%) based chemistry and the high precision controlled rolling and cooling technique in hot rolling. Further developed steel tube for stabilizer exhibits also excellent fatigue endurance induced from its high r -value (more than 1.5) property. This excellent crystallographic characteristics can be obtained by the warm reducing in the "HISTORY" process and contribute to improve the fatigue life by suppressing the wall thickness reduction during bending applications. Moreover, JFE Steel has been promoting the application of steel tube to automotive suspension parts, with not only newly developed steel tubes mentioned above, but also with the analysis of the formability of high strength tube in rotary draw bending process and the development of the related new rotary bending method without both mandrel and wiper.

1. 緒言

近年、燃費向上のための車体軽量化と、乗員保護のための車体高強度化の要求を同時に満足できる有効な手段の一つとして、従来、鋼板や棒鋼あるいは鋳造製であった部品を鋼管で中空化する例が多くなっている。

この用途の鋼管には、高強度鋼管や高炭素鋼管でありながら極めて厳しい塑性加工が行なわれるなど、従来にない高機能化が必要とされる。

以上のような状況の中で、JFE スチールは、鋼板素材、鋼管製造プロセスの開発を行い、780 MPa 級の高加工性電縫鋼管¹⁾や、高加工性・高寸法精度 HISTORY 鋼管²⁾などの高機能鋼管の開発を進めてきた。さらに、そのような高機能鋼管の開発だけでなく、Fig. 1 に示すような高強度鋼管の曲げ加工などの鋼管 2 次加工技術、性能評価技術を有

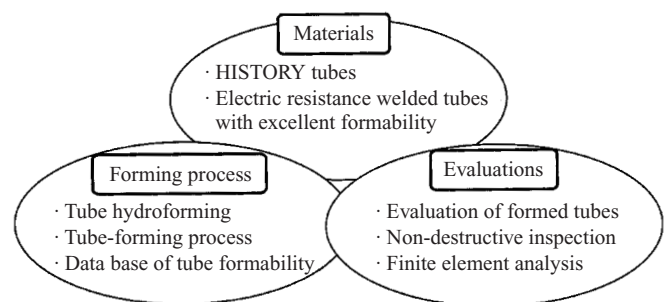


Fig. 1 Schematic description of correlated development items for tube applications to automotive structural parts

機的に連携させた取り組みを進めて、トーションビーム、スタビライザー、ロアアーム用鋼管の商品開発を具現化してきた。

本報告では、これらの最近の開発事例について紹介する。

2. 焼入れ型トーションビーム用鋼管

近年、サスペンション部品の軽量・小型化という観点から、高剛性・閉断面素材としての鋼管がトーションビーム式サスペンションに適用される例が増えている^{3~5)}。特に高い静的強度、疲労特性が必要な場合、焼入れによる高強度化が有効と考えられるが、その一方で異形断面成形のために、高強度化とは相反する hidroフォーム成形性やプレス成形性が要求される。さらに、溶接性、化成処理性、低温靱性、耐水素脆性なども、重要な実用特性である。ここでは、このようなさまざまな必要特性を兼備すべく新たに開発した、焼入れ型トーションビーム用鋼管の材質特性について報告する。

2.1 ねじり疲労特性に及ぼす強度、ミクロ組織の影響

疲労特性に及ぼす素材強度とミクロ組織の影響を、0.1~0.2% C-0.4% Si-1.9% Mn-0.2% Cr-0.2% Mo-0.01% P-0.001% Sを基本組成とする実験室真空溶解材を用いて評価した。鋼塊を熱間圧延し、ソルトバスでオーステナイト-フェライト2相域およびオーステナイト単相域に加熱後、直ちに水冷し、その後、焼もどし処理を施した。平行部寸法φ6 mmの丸棒試験片により応力比-1、繰返し速度33 Hzでねじり疲労特性を評価した。

Photo 1 に熱処理後の顕微鏡組織を示す。オーステナイト-フェライト2相域加熱材はフェライト+マルテンサイト組織、オーステナイト単相域加熱材はマルテンサイト組織を呈している。フェライト+パーライト組織は熱間圧延したままの比較材である。

Fig. 2 にねじり疲労試験における応力振幅と疲労寿命の関係を示す。540~1380 MPaの範囲で引張強度の増大にと

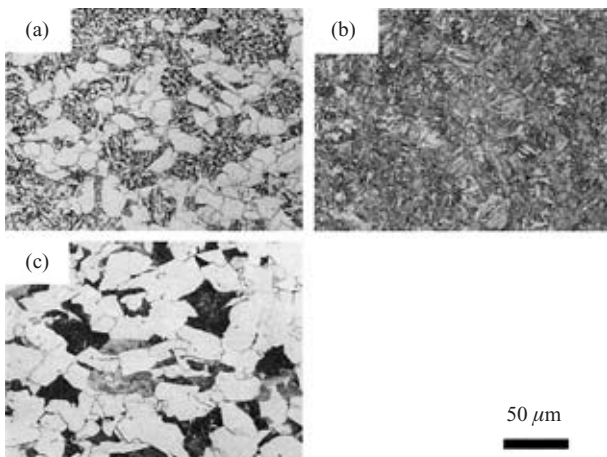


Photo 1 Optical micrographs of heat treated specimens for torsion fatigue test (a) Ferrite and martensite; TS = 920 MPa, (b) Martensite; TS = 1380 MPa, (c) Ferrite and pearlite; TS = 540 MPa

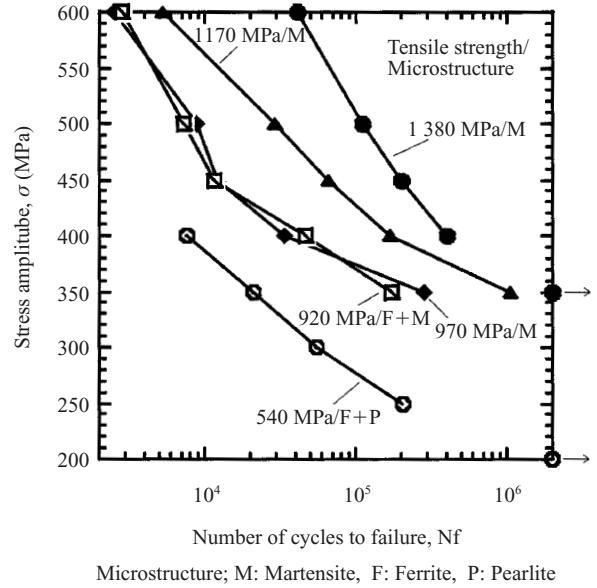


Fig. 2 Fatigue endurance (S-N) curves of high tensile steels under completely reversed torsion

もない、疲労強度は単調に増加した。初期亀裂発生抑制という観点からは軟質なフェライト組織のないマルテンサイト組織が、疲労亀裂伝播抵抗という観点からは亀裂先端での塑性変形による応力緩和という点でフェライト+マルテンサイト組織が、それぞれ有利と考えられたが⁶⁾、引張強度約950 MPaのマルテンサイト組織とフェライト+マルテンサイト2相組織は応力によらず同等の疲労寿命を示した。以上のねじり疲労試験結果より、成形性、化成処理性、低温靱性などに有利な、より少ない合金元素量で高い強度の得られるマルテンサイトを基本組織とした。

2.2 低温靱性、耐水素脆性に及ぼす硬度、微視組織の影響

トーションビーム用鋼管には高張力ボルトと異なり、降伏点を超える定常引張応力は作用しないが、素材の強度域が高いことから、希塩酸中での4点曲げ試験により耐水素脆性を評価した。0.14~0.2% C-0.3% Si-1.5% Mn-0.01% P-0.001% S-(Cr, Mo)を基本組成とし、JIS規定の炭素当量を0.6%以下とした実験室真空溶解材を熱間圧延し、オーステナイト単相域に加熱後、直ちに水冷し、焼もどした。2 mmVノッチシャルピー試験片により衝撃特性を評価するとともに、4点曲げ試験片にて、1 N塩酸中、負荷応力1180 MPaの条件で4点曲げ試験⁷⁾を行った。

Table 1 にシャルピー衝撃特性と4点曲げ試験結果を示す。供試材はいずれも0°Cにおける吸収エネルギーが80 J/cm²以上、破面遷移温度-60°C以下の良好な衝撃特性を示した。1 N塩酸中での4点曲げ試験では240 h割れなく、良好な耐水素脆性を示した。

なお、SEMによる微視組織観察の結果、供試材はいずれも微細炭化物がマルテンサイトラス内に析出しており、

Table 1 Charpy impact properties and delayed fracture resistance

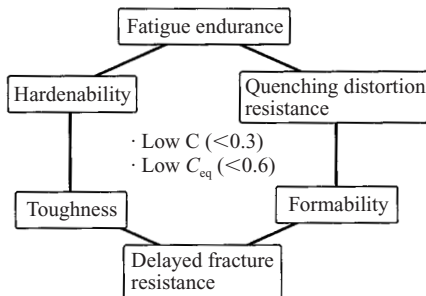
HV10	Charpy impact properties		Delayed fracture resistance
	vE ₀ (J/cm ²)	vTrs (°C)	Time to fracture (h)
431	113	-100	>240
454	103	-80	>240

HV10: Vickers hardness obtained using a 10 kgf force
 vE₀: Charpy absorbed energy at 0°C
 vTrs: Charpy fracture appearance transition temperature

高強度冷間圧延鋼板の場合と同様⁸⁾、炭素当量を低くおさえ、炭化物の微細分散した低炭素マルテンサイト組織が、良好な衝撃特性と耐水素脆性を得るために有効であることを確認した。

2.3 焼入れ型トーションビーム用鋼管の基本材質設計と実用特性

以上のような個々の特性に対する材質因子をそれぞれ勘案し、焼入れ型トーションビーム用鋼管を開発・商品化した。Fig. 3 にトーションビーム用鋼管の必要特性と材質設計の考え方を示す。炭素量と焼入れ合金元素量は疲労強度



C_{eq}: Carbon equivalent; C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14(JIS)

Fig. 3 Concept of developed steel tube for torsion beam



Photo 2 Rear axle to which the developed steel tube for torsion beam is applied

や焼入れ性の安定確保に必要十分な量にとどめ、熱間圧延における高精度制御冷却技術との組合せによりフェライト分率を確保し、焼入れ性・疲労強度と相反する成形性を確保した。低C化、低炭素当量化は、焼入れ時の最大硬度の抑制や炭化物のマルテンサイトラス内への微細析出をとおして、焼入れ後の衝撃特性、耐水素脆性も向上させる。さらに、低C化、低炭素当量化にともなうマルテンサイト変態温度の上昇は、焼入れ工程、塗装焼付け工程におけるマルテンサイト組織の自己焼もどしを促進するため、付加的な焼もどし工程を省略できる。さらに、アーク溶接性、化成処理性にも、780 MPa 級サスペンション、シャシー部品用鋼管¹⁾と同様、配慮した成分を採用した。実用に先立ち、耐水素脆性は、塩酸浸漬試験に加え、電気化学的な水素付加試験、腐食疲労試験など多面的に評価を行った。なお、焼入れ後の疲労強度は、素材強度に加え、表面硬度⁹⁾、表面性状・粗さ¹⁰⁾、残留応力^{11,12)} という要因を勘案することが安定確保に重要である。

以上の考え方に基づき開発した焼入れ型トーションビーム用鋼管の特性を、Table 2 に示す。優れた成形性、焼入れ性、疲労特性、衝撃特性、化成処理性、溶接性、耐水素脆性、耐焼入れ歪性を有する本鋼管は、需要家での評価試験をとおしてトーションビームに適用可能であることが確認され、Photo 2 に示すような実車部品に採用されている。

3. スタビライザー用 HISTORY 鋼管

従来、棒鋼が用いられてきた自動車のスタビライザーなど足回り部品においても、鋼管を用いて中空化することで高強度と軽量化を両立させる試みがなされている¹³⁾。これらの部品は、高い疲労強度を得るために、一般にC: 0.20~0.45%の高炭素鋼を用いて、成形後、焼入れ、焼もどしなどの熱処理が施される。しかし、従来の高炭素電縫鋼管には、電縫溶接部が著しく硬化することや、伸びが低いといった加工性の問題を発生する場合があった。さらに、素材の強度が高いために、これらの部品で必要とされる細径厚肉の鋼管を冷間で造管することが困難であるという製造上の問題もあった。このような傾向は、調質後に高強度を得るためにC量を増加していくと、特に顕著となる問題である。当社の新しい電縫鋼管製造技術、HISTORY²⁾はこのような問題の解決に有効である。HISTORY 鋼管は、太径の母管を縮径圧延して細径の製品を製造するため、細径厚肉鋼管の製造に適している。このような製造方法は、継目

Table 2 Typical properties of developed steel tube for quench type torsion beam

Formability, El (%) (JIS 12A)	Hardenability*	Fatigue endurance	Toughness, vTrs (°C)	Paintability	Arc weldability	Delayed fracture resistance**	Quenching distortion resistance
26	-30	Good	-80	Good	Good	No fracture	Good

El: Elongation, *Critical cooling rate from 950°C (°C/s), **Four-point bending test in 1 N HCl

無し鋼管¹⁴⁾ や一部の電縫鋼管¹⁵⁾ で行なわれているものであるが、HISTORY 鋼管は、これらでは実施されていない温間域で縮径圧延することにより加工性を向上させ、かつ、新開発の4ロールレデューサーで縮径圧延を行なうことにより高寸法精度な細径厚肉鋼管を製造¹⁶⁾ する。ここでは、自動車のスタビライザーなどの曲げ加工のある部品に適した高炭素 HISTORY 鋼管の特性について紹介する。

3.1 HISTORY 鋼管の曲げ加工性

高炭素鋼 (STKM15A: 0.3% C-0.8% Mn 鋼) における HISTORY 鋼管と従来の電縫鋼管の引張特性を Table 3 に比較する。HISTORY 鋼管では、従来の電縫鋼管と比べて、高い均一伸び (uEl), 全伸び (total El) が得られている。この効果は、HISTORY 鋼管の加熱、温間縮径圧延で電縫鋼管を冷間で造管した時の加工硬化が解消されるためである。さらに、特徴的であるのは、極めて高い長手方向の r 値 (引張試験における板幅歪 / 板厚歪, 引張加工時の減肉しにくさの指標) を有していることである。この結果、HISTORY 鋼管では、Fig. 4 に示すように、従来の電縫鋼管と比べて、曲げ加工における減肉を抑制することができる。このような減肉は、疲労強度を低下させる原因であり、スタビライザーなどの曲げ加工部のある部品では、HISTORY 鋼管を適用することで疲労強度が向上すると考えられる。HISTORY 鋼管の高 r 値は、温間域 (650~900°C) での縮径圧延により得られたものであり、鋼板を単純に管形状に成形する従来の電縫鋼管、それを熱処理した鋼管、さらには、熱間域で縮径圧延した鋼管では、得られ

Table 3 Tensile properties of STKM 15 A (JIS 12A, 3.2 mm thickness)

	YS (MPa)	TS (MPa)	uEl (%)	total El (%)	r
HISTORY tube	532	638	17.9	30.9	1.52
Conventional ERW steel tube	515	614	13.7	26.9	0.89

YS: Yielding stress, TS: Tensile strength, uEl: Uniform elongation, total El: Total elongation, r : Lankford value

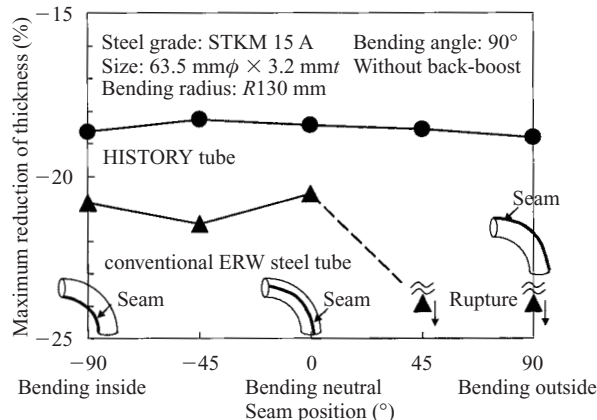


Fig. 4 Maximum reduction of thickness in stretch-bending test

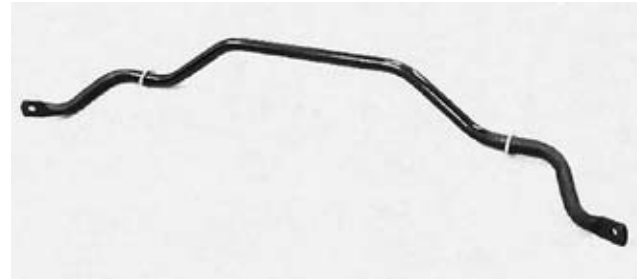


Photo 3 HISTORY tube application to automotive stabilizer

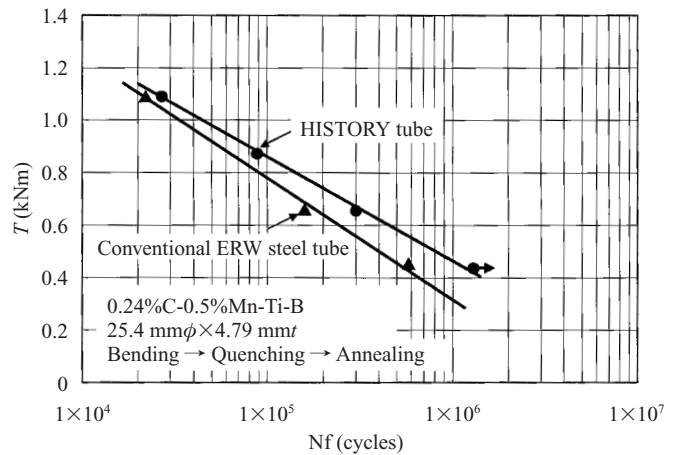


Fig. 5 Comparison of fatigue property between HISTORY tube and conventional ERW steel tube

ない。温間縮径圧延することにより、縮径圧延に特有の RD//<110>, ND//<111>~<221>~<110> の圧延集合組織が顕著に発達して r 値が向上する^{2,17)}。この高 r 値化の機構は、薄板で高 r 値を得るために利用されている ND//<111> 方位を主体とした再結晶集合組織の発達とは異なっており、薄板では高 r 値化が困難な高炭素鋼管においても、温間縮径圧延により 1.5 を超える高 r 値を達成することができる。

3.2 HISTORY 鋼管の適用例

HISTORY 鋼管は、以上のような優れた特長を有し、Photo 3 に示したような自動車のスタビライザーなどの自動車の足回り部品に適した高炭素細径厚肉鋼管である。スタビライザーへの適用検討では、Fig. 5 に示すように、その良好な曲げ加工性や高寸法精度により、実部品形状における疲労寿命が、従来の電縫鋼管と比較して約 2 倍以上に向上した例が確認されている。

4. 高強度鋼管の加工技術

近年、自動車用部品への鋼管の適用が注目され、チューブ hidroforming (THF: tube hydro forming) の適用検討例が多く報告されている¹⁸⁾。THF で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も多い¹⁹⁾。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、適正な加工工程と加工条件を選定することが重要である。また、成形品については加工硬化を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。

THF において必要となるさまざまな加工法の加工特性について JFE 技報 No. 4¹⁾ で概説した。ここでは、自動車用鋼管の二次加工に多く適用されるが、報告例の少ない曲げ加工技術に着目し、高強度鋼管の曲げ加工特性と新しい曲げ加工技術について報告する。

4.1 曲げ加工性

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²⁰⁾。回転引き曲げ加工法 (Fig. 6) は、ワイパーによる曲げ内側のしわ防止と管プースターの後方推力

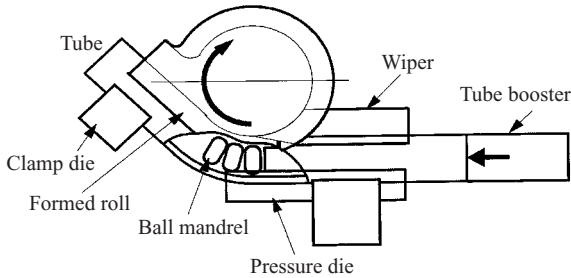
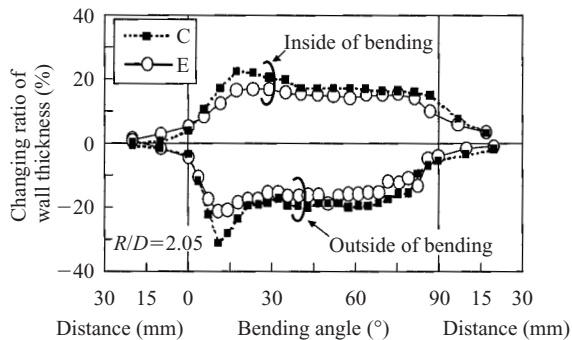


Fig. 6 Schematic illustration of tube rotary draw bending equipment



Specimen E is TS780 MPa grade HISTORY tube, which is compared by that of conventional electric resistance welded steel pipe type C.

Fig. 7 Wall thickness distribution of high tensile steel tubes in rotary draw bending

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。特に、高強度材で小さな曲げ半径に曲げる場合、曲げ外側の減肉による破断を防止する必要があり、素管延性の確保と加工条件の最適化による減肉抑制が重要な課題となる。

回転引曲げ加工特性を調査した強度水準、履歴の異なる高強度鋼管の機械的性質を Table 4 に示す。R/D = 2.05, 管プースター推力無しの条件で回転引曲げ加工を行い、曲げ内外側の肉厚変化率分布を調査した結果を Fig. 7²¹⁾ に示す。590 MPa 級鋼管の回転引き曲げ加工では、造管したままの電縫鋼管 (素材 A) だけ曲げ開始初期に局所的な減肉が発生するが、熱処理電縫鋼管 (B) と HISTORY 鋼管 (D) では発生しない。さらに高強度になると、熱処理電縫鋼管 (C) で顕著な局部減肉が発生するのに対し、780 MPa 級 HISTORY 鋼管 (E) では局部減肉が殆ど発生していない。

このような減肉に及ぼす素管の機械的性質の影響についての報告²²⁾ は少なく、高強度鋼管に関する報告はない。回転引曲げ加工の最大減肉率に及ぼす材料・加工条件の影響を調査するため、370~780 MPa 級鋼管の回転引曲げ試験結果の要因分析を行った。機械的性質として一様伸び (uEl) と管軸方向 r 値 (r_ϕ)、曲げ加工条件として管プースターによる後方軸押し圧力比 ($z = P_b/Y_S$, $P_b =$ 管プースター推力 / 素管断面積) を用い、最大減肉率 γ に関する (1) 式の各影響係数の曲げ半径に対する変化の結果を Fig. 8 に示す。曲げ半径が小さいほど、素材の n 値、r 値が減肉抑制に及ぼす効果が大きい²¹⁾ ことから、曲げ半径が小さくなるほど

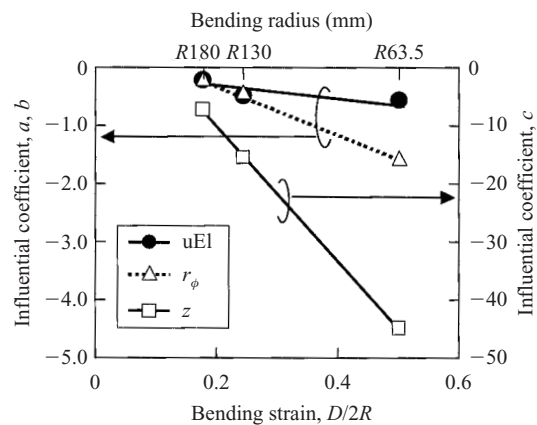


Fig. 8 Change of influential coefficients of the Eq. (1)

Table 4 Tensile properties of steel tubes for rotary draw bending (OD63.5 × t3.2 mm)

Pipes		YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	n-value ($\epsilon=5-15\%$)
ERW steel pipes	A As rolled pipe	515	614	27	0.11
	B Heat treated at 900°C	384	581	31	0.20
	C Heat treated at 900°C	576	711	21	<0.10
HISTORY pipes	D The same material as A and B	532	638	31	0.20
	E The same material as C	565	796	25	<0.10

YS: Yielding stress, TS: Tensile strength, El: Elongation

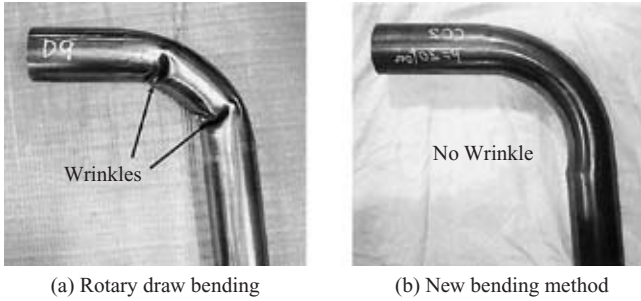


Photo 4 Shapes of bent tubes (Tube size: $\phi 70 \times t 2.6$ mm, 780 MPa grade ERW steel tube)

減肉を抑制するために機械的性質の向上が重要であることが分かる。

$$\gamma = a \cdot uEl + B \cdot r\phi + c \cdot z + d \dots\dots\dots (1)$$

4.2 新しい曲げ加工技術

一方、回転引き曲げ加工技術について考えると、薄肉管の曲げにおいてはワイパーとボール式マンドレルの適用は必須であり、製造時間短縮が難しいという課題がある。また、高強度材になるほど曲げ加工条件について厳密な調整も必要となる。

このような技術課題に対し、当社はトヨタ自動車(株)殿、(株)太洋殿と共同して、ワイパーおよびマンドレルなしで高強度鋼管を比較的小さな曲げ半径に曲げることが可能な曲げ加工技術の開発を行い、押し付け曲げ方式による新しい回転曲げ加工法を開発した。ワイパーおよびマンドレルなしで780 MPa級電縫鋼管の曲げ加工 ($R/D = 2.0$) を行った場合 (Photo 4)、回転引き曲げ加工法では内側に大きなしわが発生するが、開発した曲げ加工法では良好な曲げ形状が得られ、減肉も少ない。

4.3 THF 技術への波及効果

上に述べた曲げ加工特性や新しい回転曲げ加工法により、高強度鋼管を適用した新しい自動車部品が実用化されている。複雑な断面形状で三次元形状の部品加工にTHFプロセスを適用する場合、予成形における、このような曲げ加工技術の重要性は非常に高い。

5. 結言

JFE スチールは、高機能鋼管の開発を行なうとともに、さらに、曲げ加工などの鋼管2次加工技術、性能評価技術を有機的に連携させた取り組みを進めて、多くの自動車用

鋼管の商品開発を進めてきた。今後も、さらなる車体軽量化・高強度化の要求にこたえるべく、新たな自動車部品用鋼管の開発を進めていく。

参考文献

- 1) 豊田俊介, 鈴木孝司, 佐藤昭夫. JFE 技報. no. 4, 2004, p. 28.
- 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) 川島尚登. TOYOTA Tech. Rev. vol. 52, no. 1, 2002, p. 42.
- 4) M. Schaik. SAE Technical Paper Series 2002-01-0045, 2002.
- 5) K. Nasu. Proc. Int. Joint Symp. of 195th the Technology of Plasticity, 2000, p. 209.
- 6) たとえば, 田中啓介, 中井善一, 秋庭義明. 鉄と鋼. vol. 79, no. 8, 1993, p. 908.
- 7) 豊田俊介, 齊藤孝信, 吉武明英. 材料とプロセス. vol. 12, no. 3, 1999, p. 484.
- 8) 長滝康伸, 津山青史, 細谷佳弘, 金藤秀司, 奥山健. 日本金属学会会報. vol. 32, no. 4, 1993, p. 238.
- 9) Dolan, T. J. Yen, C. S. Proc. ASTM. vol. 48, 1948, p. 664.
- 10) 富田邦和, 塩崎毅, 占部俊明, 大澤絃一. 鉄と鋼. vol. 87, no. 8, 2001, p. 557.
- 11) Moore, H. F. Kommers, J. B. Jasper, T. M. Proc. ASTM. vol. 22, 1922, II, p. 226.
- 12) Gerber, H. Z. Bayerischen Architekten Ingen. - Ver-eins, vol. 6, 1874, p. 101.
- 13) たとえば, 井上関次. ばね論文集. vol. 28, 1983, p. 46.
- 14) たとえば, 日本塑性加工学会. 棒線・形・管圧延. コロナ社, 1991, p. 218.
- 15) 渡部義広, 荒木敏, 水橋伸雄, 高杉直樹, 萬ヶ谷鉄也, 杉浩司, 福田真一, 柏村英樹. 新日鉄技報. no. 362, 1997, p. 17.
- 16) 長浜拓也, 依藤章, 大西寿雄, 森岡信彦. 第54回塑性加工連合講演会講演論文集. 2003, p. 403.
- 17) 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.
- 18) たとえば, Kawabata, Y.; Aratani, M.; Kenmochi, K.; Sakata, K.; Hashimoto, Y.; Toyooka, T.; Nishimori, M.; Koyama, Y. Proc. of the TUBEHYDRO 2003. p. 92.
- 19) 鈴木孝司, 上井清史, 豊田俊介, 森孝男, 于強, 白鳥正樹. 日本機械学会論文集(A). vol. 70, no. 691, 2004, p. 159.
- 20) Fleming, T.; Kibben, M.; Mertens, O. Proc. of the TUBEHYDRO 2003. p. 27.
- 21) 橋本裕二, 鈴木孝司, 豊田俊介, 郡司牧男, 佐藤昭夫. 平16 塑加春講論. 2004, p. 291.
- 22) 佐藤一雄, 高橋社治. 塑性と加工. vol. 23, no. 252, 1982, p. 17.



豊田 俊介



河端 良和



鈴木 孝司