

# 高強度鋼管の新しい曲げ加工法 (PRB) 開発と 自動車用鋼管

## Development of a New Bending Method “PRB” for High Strength Steel Tube and Application of High Strength Steel Tubes for Automotive Parts

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  
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)  
佐藤 昭夫 SATO Akio JFE スチール 知多製造所 商品技術室 主任部員(副部長)  
上野 行一 UENO Yukikazu トヨタ自動車(株) シャシー製造部 主幹  
岡田 正雄 OKADA Masao (株)太洋 取締役

### 要旨

JFE スチールは、トヨタ自動車(株) および (株)太洋と共同して、薄肉管の回転引き曲げ加工で必須の心金としわおさえを省略し、高強度薄肉鋼管に適用可能な新しい曲げ加工技術 (PRB 法) を開発した。同時に 780 MPa 級高加工性電縫鋼管の開発を行い、世界初の 780 MPa 級電縫鋼管適用パイプアーム部品の実用化に貢献した。消耗工具で調整に熟練を要する心金やしわおさえを省略することにより、従来技術では実用的に困難であった高強度薄肉鋼管の高効率の曲げ加工を可能にするとともに、高強度異形鋼管の曲げを可能にした。

### Abstract:

JFE Steel has developed a new bending method (PRB) for thin-walled high strength steel tubes without a mandrel and a wiper in collaboration with Toyota Motor Corp. and Taiyo Corp. JFE Steel also developed the 780 MPa class electric-resistance-welded tubes (ERW tubes) for automotive suspension parts, and contributed to the realization of the development of the arm parts applying 780 MPa class ERW tubes. By eliminating the mandrel and the wiper, which wear out eventually and require long adjusting time, in the rotary draw bender, this new bending method enables the bending of the thin-walled high strength steel tube in high productivity as well as enabling the bending of the thin-walled high strength steel tube with irregular shape.

## 1. 緒言

近年、燃費向上と衝突時の乗員保護のために必要な車体軽量化と高剛性化の要求を同時に満足させる有効な手段の一つとして、中空・閉断面構造が注目されている。自動車用構造部品では薄板プレス成形品の溶接構造部品が多いが、チューブハイドロフォーミング<sup>1)</sup> (THF) により鋼管を複雑形状に成形した中空部品が実用化され、自動車用構造部品に鋼管を適用する動きが盛んになりつつある。鋼管を適用した部品は、従来のスポット溶接した薄鋼板部品と比べて軽量化、高剛性化、部品点数削減などの効果が大きい。

一方、車体軽量化のために鉄鋼素材のハイテン化<sup>2)</sup> が進行しており、車体のハイテン化はさらに進むと予測されている<sup>3)</sup> が、THF プロセスで 590 MPa 級以上の高強度鋼管を適用して実用化した自動車部品に関する報告はなく、高強度化の傾向は顕在化していない。3 次元的に小さな曲げ半径に曲げ (小 R 曲げ) られた複雑な部品形状では回転引き曲げ加工技術が重要であるが、高強度鋼管の曲げ加工事例の報告はなく、その曲げ加工特性が報告されたのは最近<sup>4)</sup> である。

著者らは、高強度薄肉鋼管の曲げ加工が可能で、従来の回転引き曲げ加工法に比べて生産性が高い曲げ加工法の開発を共同で行った。この曲げ加工法は外径絞りをともなう複合応力下の新しい曲げ加工技術 (PRB 法: Bending Method with Slight Reduction of Diameter by Push with Pressure Die and Rotation of Bending Die, 通称プッシュ

ロータリー曲げ) であり, 薄肉管の小  $R$  曲げ加工に必須の心金 (マンドレル) やしわおさえ (ワイパー) を併用せず, 高強度鋼管を回転引き曲げ相当の曲げ半径に曲げることが可能である。本報告では, 曲げ半径比 ( $R/D$ ,  $R$ : 中立軸曲げ半径,  $D$ : 管外径) = 2.0 近辺の小  $R$  曲げの加工法の現状と曲げ加工方法の特徴, 同時に開発した自動車用鋼管と実部品の例について報告する。

## 2. 既存の小 $R$ 曲げ加工法の現状

### 2.1 回転引き曲げ加工法

#### 2.1.1 技術的な変遷と適用状況

回転引き曲げ加工法 (Fig. 1) の歴史は古く, ボイラーや航空機用配管の小  $R$  曲げ加工技術として基本的な技術は 1940 年代に確立され<sup>5)</sup>, 1950 年代後半に矩形断面形状の回転引き曲げ加工技術が開発された<sup>6)</sup>。管ブースター機構は, 1960 年代から適用され<sup>7)</sup>, 1980 年代に CNC 化された<sup>8)</sup>。自動車分野ではマフラーやシートフレームの曲げ加工用途に早くから適用されている。回転引き曲げ加工は心金やしわおさえの工具 (Photo 1) を用いることにより, 薄肉管の小  $R$  曲げ限界が大幅に向上するとともに, 断面形状の不整も抑制することができる。たとえば,  $t/D = 4\%$  以上の 390 MPa 級鋼管では心金やしわおさを適用しない場合には  $R/D = 4.5$  が限界であるが, 心金やしわおさを適用することにより,  $R/D = 1$  程度の小  $R$  曲げが可能となる。また, 管ブースターやプレッシャーダイによる軸押し込み力制御を行うことにより減肉の抑制もある程度可能であるため, 高精度曲げ加工法に位置付けられ<sup>9)</sup>, 流体輸送部品と構造部品の両方に適用されている。この曲げ加工法では, 390 MPa 級以下の鋼管ならば比較的薄肉で延性が確保されるため, 小  $R$  曲げが可能であり, CNC 化によりさらに汎用

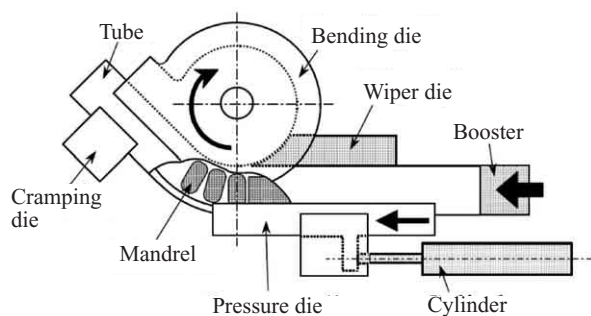
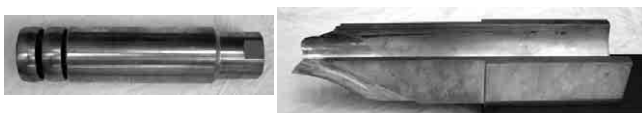


Fig. 1 Schematic diagram of rotary draw bending



(a) 2 Ball type mandrel (b) Wiper  
Photo 1 Tools for rotary draw bending

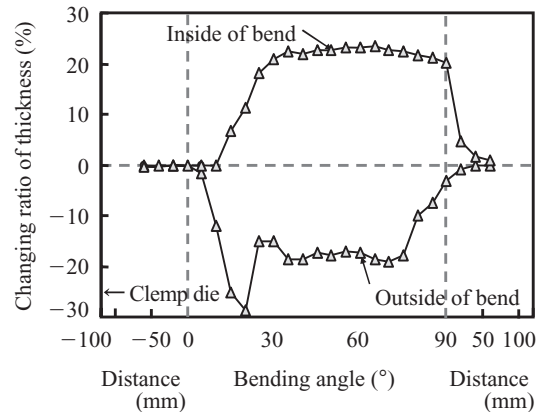


Fig. 2 Wall thickness distribution of high tensile steel tubes in rotary draw bending (TS780 MPa electric resistance welded steel pipe, OD70 × WT2.6 mm,  $R/D = 2.05$ )

的に適用されている。

#### 2.1.2 薄肉鋼管の回転引き曲げ加工で

##### 留意すべき点

回転引き曲げ加工法で小  $R$  曲げを行うには素管に高い延性が必要と指摘されていた<sup>9)</sup> が, 780 MPa 級高強度薄肉鋼管の回転引き曲げ特性が最近報告<sup>4)</sup> され, 電縫鋼管において曲げ開始初期の局部減肉 (Fig. 2) が指摘された。技術的な他の指摘<sup>10)</sup> も含め, 回転引き曲げ加工法において, 技術的に留意すべき点を以下に示す。

- (1) 小  $R$  曲げを行う場合には素管の高い延性が必要であり, 特に高強度化により延性低下が避けられない高強度薄肉鋼管では曲げ加工限界が低下し, 限界曲げ半径が増加する。
- (2) 薄肉管では心金・しわおさえの適用が必須であるため, 両端口絞り管やテーパ管の異形断面管の曲げ加工ができない。
- (3) しわおさえや心金という摩耗しやすい工具が必須であるため, 工具の維持管理や曲げ加工精度を保持するための工具調整に熟練を必要とする。

## 2.2 その他の曲げ加工法

前記の回転引き曲げ加工法は小  $R$  曲げ加工法 (中立軸曲げ半径  $R$ / 管外径  $\leq 2.0$ ) に対して最も汎用的に適用されている。ここでは, 現在までに開発または研究されたその他の曲げ加工法について示す。

#### 2.2.1 押し付け曲げ加工法

押し付け曲げ (Fig. 3) は, 固定された曲げ型に素管の一端を固定し, 型の周囲に移動可能な押し付け型を用いて素管を曲げ型に押し付けながら成形する方法である。1960 年代の Frantz の文献<sup>11)</sup> を引用する例は多いが, 検討は少ない<sup>12)</sup>。

#### 2.2.2 押し通し曲げ法

回転引き曲げ加工機の出現以降に開発され実用化された冷間の曲げ加工技術としては, 1980 年代後半に開発された

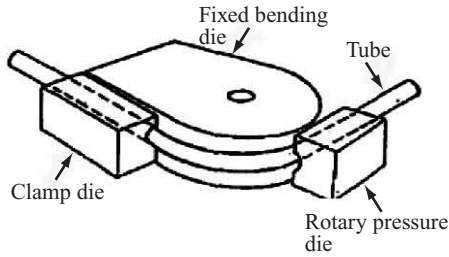


Fig. 3 Schematic diagram of compression bending

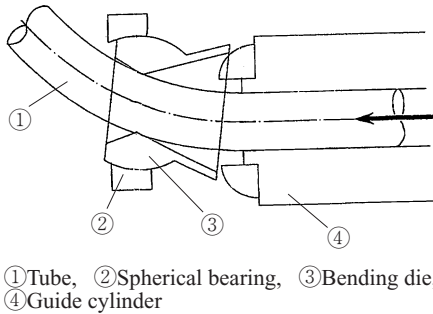


Fig. 4 Schematic diagram of push through bending

押し通し曲げがある。比較的小径の管材に適用される MOS 曲げ (Fig. 4)<sup>13)</sup> と  $\phi 114.3$  mm までの管径に適用される (株) オプトンの CNC 曲げがあり、穴ダイスの支持機構が異なる。この曲げ加工法による薄肉鋼管の小  $R$  曲げ限界は  $R/D > 2.0$  であり、小  $R$  曲げには心金が必要<sup>14)</sup> で、高い外径精度の素管が必要である。

### 2.2.3 ベンドローリングプロセス

帯鋼圧延時に圧延出側で管中心軸と直行する方向に押し込む拘束治具を用いた帯板の面内曲げ手法が検討<sup>15)</sup> され、パイプの絞り圧延と出側拘束治具の押し込みによるパイプの曲げ加工法 (Fig. 5) が検討された<sup>16)</sup>。  $T/D \geq 5\%$  のアルミニウム管を用い、10%未満の絞り圧延を行いつつ出側拘束治具の位置調整により  $R/D \geq 4.3$  の大きな曲げ半径の曲げ加工が行われた。多方向に曲げるには多ロール圧延機が必要となり、疑似3次元の小  $R$  曲げでは曲げ半径の安定性、3次元曲げの精度などに課題が残ると考えられる。

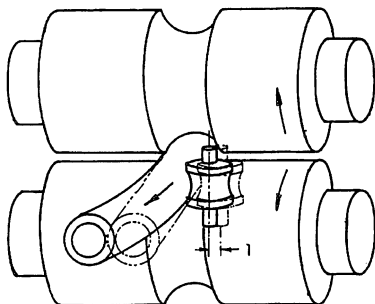


Fig. 5 Schematic diagram of bend-rolling process

## 3. 新しい曲げ加工法 (PRB 法) の開発

### 3.1 高強度薄肉鋼管の

#### 効率的な曲げ加工法の必要性

回転引き曲げ加工法は流体輸送用途への適用を考慮して曲げ加工部の断面寸法や形状を変化させないという思想があると考えられる。パイプ後方から曲げ部に圧縮応力を作用させる管ブラスター機構を装備すると同時に心金としわおさえを併用することにより、薄肉管の曲げを可能にしているが、高強度薄肉鋼管の曲げ加工では、曲げ開始初期の局部減肉防止に対する限界と高強度材に適用する際の心金やしわおさえ工具の調整精密化という課題があり、曲げ加工工程の能率向上においても限界がある。このような観点から、高強度鋼管の曲げ加工を高効率に行うため、新しい複合応力下の曲げ加工法が必要と考え、次に述べる PRB 法開発を共同で実施した<sup>17~19)</sup>。

### 3.2 PRB 法の技術的な特徴

高強度鋼管の曲げ加工限界を向上させるための有効な手法として、複合応力下の曲げ加工法が考えられる。回転引き曲げ加工法の管ブラスター機構は軸方向の後方圧縮応力を作用させるものであるが、プレッシャーダイ、しわおさえ、心金などの工具との摩擦接触による拘束があるため、十分な効果を得ることが難しい。また、高強度鋼管が適用される構造部品用途では若干の断面寸法の変化を許容した設計が可能と考えられる。このような観点から、周方向圧縮応力を負荷するための外径絞りを曲げ加工と同時に行うことにより、素材の高強度化にともなう延性低下を曲げ加工技術で補い、かつ、高生産性を達成する曲げ加工が可能と考えられる。

#### 3.2.1 曲げ加工原理

PRB 法の曲げ加工原理を Fig. 6 に示す。曲げ開始前にプレッシャーダイを介して一定圧下力を負荷し、パイプに比較的大きな周方向圧縮力を負荷する (この状態では素管はまだ絞られていない)。曲げ加工時においては、曲げ変形と同時に事前に負荷された周方向応力と曲げ応力により外周にわずかな絞り変形が発生することにより、PRB 法の曲げ加工が行われる。曲げ加工時、すでに曲げられたパイプ

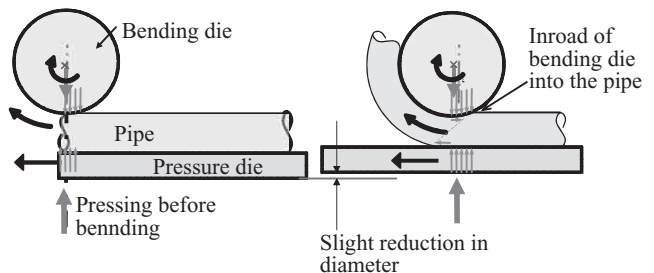


Fig. 6 Principle of PRB method

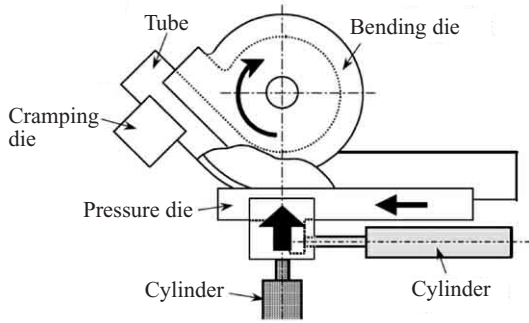


Fig.7 Schematic diagram of PRB method

は曲げ金型に巻き付いて回転することにより、曲げ半径の加工精度を確保する。曲げ初期において、曲げ角の増加とともにプレッシャーダイによる圧下が行われ、周長絞り量は曲げ角 10 ~ 20° で 3 ~ 7% に一定化し、その後曲げ外側の扁平化が進み扁平率 10% 程度で一定化する。絞り量が多い場合、曲げ内側・入側部分に曲げ金型が素管に食い込む変形が発生する。PRB 法では、プレッシャーダイにより曲げ加工部に絞りを発生させるための大きな圧下力を負荷することが必要である。

このため、PRB 法曲げ加工機の基本構造 (Fig. 7) としては、プレッシャーダイを加圧する油圧シリンダの加圧方向を曲げ金型の回転中心を通り素管に直行する直線上に配置する。また、プレッシャーダイに最適な圧下力を負荷するために圧力制御方式を採用し、大きな圧下力を負荷するための曲げ金型回転軸と圧下用油圧シリンダ支持部の両持ち構造、軸力制御用プレッシャーダイブスター機構などを採用し、薄肉管用回転引き曲げ加工機で必須の心金・しわおさえ工具や管ブスター機構を省略している。これに対し、既存の回転引き曲げ加工機 (Fig. 1) においては、プレッシャーダイは曲げ加工中その位置を固定したままで、パイプの曲げ反力だけを効率よく受けるといった設計法が採用されている。これは、曲げ加工部の断面寸法や断面形状を変化させないという考え方であり、曲げ加工時に素管を絞る思想がないことを示している。また、薄肉管の曲げ加工では、心金としわおさえの工具を適用することが必須でサイクルタイムの低減に限界があり、摩耗しやすいこれらの工具の維持管理や精密な位置調整に作業者の熟練が必要であった。

### 3.2.2 PRB 法による

#### 高強度鋼管の曲げ加工特性

Photo 2, Fig. 8 の実験に用いた鋼管は、外径 70.0 mm × 肉厚 2.6 mm の 780 MPa 級高強度薄肉電縫鋼管である。JIS 12A 引張試験片による管軸方向の機械的性質は、YS (降伏応力) = 757 MPa, TS (引張強さ) = 803 MPa, EL (伸び) = 17% である。曲げ金型のカリバー形状は真円形状とし、中心軸曲げ半径は R140 mm ( $R/D = 2.0$ ) である。曲げ角度は 90° に設定し、プレッシャーダイの管軸方向送り



Photo 2 Appearance of bent tube by rotary draw bending and PRB method

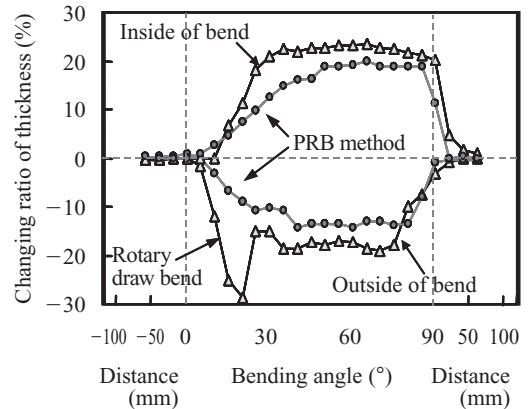


Fig. 8 Longitudinal thickness distribution of bent tube

量は曲げ中心軸弧長とした。回転引き曲げ加工機に使用したマンドレルは 2 ボールタイプであり、必要に応じてしわおさえを併用する。Photo 2 に回転引き曲げ法と PRB 法による曲げ加工品外観の比較写真を示す。しわおさえ・心金を適用しない回転引き曲げ法では曲げ内側に大きなしわが発生し、しわおさえ・心金を使用する場合くびれや破断が発生しやすく、精密な工具調整が必要である。PRB 法においては、しわおさえ・心金の工具調整は省略され、しわやくびれの発生がなく、曲げ変形時の絞りによる曲げ内側のしわ防止効果、破断防止効果が顕著に作用していることが分かる。Fig. 8 は Photo 2 と同一条件の PRB 法による曲げ加工品としわおさえ・心金を適用した回転引き曲げ加工品の長手方向肉厚分布を示す。回転引き曲げ法では曲げ加工初期 (曲げ角度 20 ~ 30° 付近) で大きな局部減肉 (くびれ) が発生しているが、PRB 法ではこの曲げ加工位置付近での局部減肉は発生していない。また、曲げ中央部 (曲げ角 45°) 付近の肉厚レベルを比較すると、PRB 法は回転引き曲げ法と比較して、曲げ外側の減肉および曲げ内側の増肉ともに小さく、肉厚分布は均一化される傾向にある。

PRB 法と回転引き曲げ法について、780 MPa 級高強度薄肉鋼管を用いて、曲げ加工後のスプリングバック量を比較した結果を Table 1 に示す。同一曲げ加工機で曲げ加工ができないこと、心金やしわおさえ工具の適用条件や管ブスターによる軸押し力の適用条件を同一に揃えることができないことを考慮して、曲げ角 90° で  $R/D = 2.0$  曲げの条件だけを揃えて比較した。PRB 法のスプリングバック量が

Table 1 Spring back angle of bent tube by PRB method and rotary draw bending

Applied tube	Grade: 780 MPa class Size: OD70 × WT2.6 mm	
Bending angle (°)	90	90
Bending radius of central axis (mm)	140	140
Mandrel and wiper	None	3 ball-mandrel and wiper
Pressure force by booster	None	10 tf (98 kN)
Pressure force by pressure die	15 tf (147 kN)	None

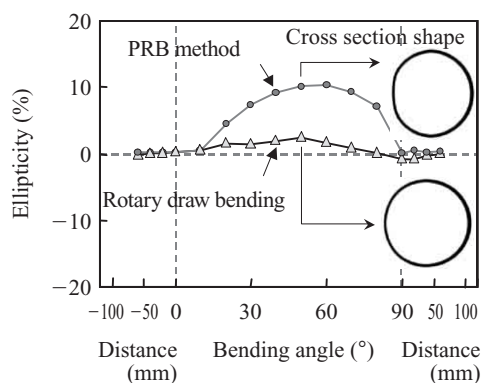


Fig.9 Ellipticity of bent tube

若干大きいですが、装置の違いなども含めると、ほぼ同等のスプリングバック量と考えられる。

2種類の曲げ加工法における扁平率の長手方向分布を検討した結果を Fig. 9 に示す。扁平率ξは(1)式で定義する。

$$\xi = (H - W)/OD \dots\dots\dots (1)$$

ξ：扁平率,

H：長径,

W：短径,

OD：素管外径

心金を使用しないプッシュロータリー曲げ加工法の扁平率最大値が10%程度であるのに対し、心金としわおさえを使用した回転引き曲げ加工法の扁平率最大値は2～3%と小さい。扁平を少なくするにはクリアランスの小さな心金の適用が有効であることを示している。PRB法は曲げ加工部に3～7%程度の絞り変形を与えることにより、しわおさえや心金を省略しても曲げ内側のしわを抑制することができる技術であり、曲げ部の断面形状・寸法精度を確保するには限界がある。したがって、高精度の断面寸法を要求されない構造部品や曲げ後のTHFなどにより断面を再成形する場合の予成形用途に好適な曲げ加工法と考えられる。

### 3.2.3 PRB法の研究開発により新たに得られた知見

PRB法は、高強度鋼管を心金・しわおさえなしで回転引き曲げ加工（心金・しわおさえあり）に近い小R曲げ加工を可能にする、新しい曲げ加工法である。この研究開発において得られた知見を次に示す。

- (1) 1行程で直線部を持つ複合R形状の曲げが可能である。
- (2) 素管の送り・傾転機構を追加することにより、疑似3次元曲げが可能である。
- (3) 心金の省略により、両端口絞り部品、テーパ管などの異形断面管の曲げ加工が可能である。
- (4) 曲げ加工部を積極的に絞ることにより、部分的な周長制御や断面の扁平加工が可能で、プレス成形工程の省略に有効である。
- (5) 心金・しわおさえの省略により、金型調整時間の削減・サイクルタイム短縮、金型費削減のメリットがあると同時に、熟練を要するこれらの調整作業が不要となった。

## 4. 自動車用高強度鋼管と

### PRB法を適用して開発された実部品例

#### 4.1 780 MPa級電縫鋼管

サスペンション、シャシー部品用鋼板では、成形性に加え、疲労特性、衝撃特性、塗装適合性、材質安定性などの実用機能特性が重視される。サスペンション・アーム用途では、このような実用機能特性を考慮した高強度鋼管の開発が必要である。本節では、後述の高強度アーム部品に適用された780 MPa級電縫鋼管<sup>20)</sup>について概説する。

高強度薄鋼板では、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と成形性のバランスに良好とされている<sup>21)</sup>が、この鋼管の熱間圧延鋼板ではフェライト、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R/D < 2.0の曲

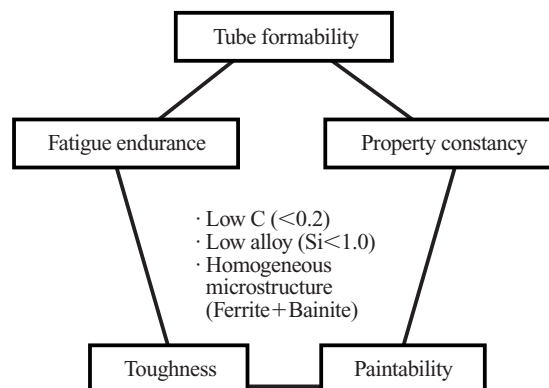


Fig. 10 Concept of material design about 780 MPa class electric resistance welded tube

Table 2 Merits by applying 780 MPa class ERW tube to automotive part bent by PRB method

Items	Press formed part (Steel sheet)	Bent and hydraulic formed part (ERW tube)	Merits
Total number of production process (Forming and welding)	100%	28%	-72%
Number of assembled parts	100%	71%	-29%
Weight/One part	100%	82%	-18%
Cost/One part	100%	74%	-26%



Photo 3 Automotive part applied PRB method and 780 MPa class ERW tube



Photo 4 Automotive part applied PRB method and 590 MPa class ERW tube

げ加工を可能にする優れた延性を得ている。このような均質組織化は、複合組織化に必要とされる Si などの元素低減などとともに、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。この鋼管は、Fig. 10 に示す材質設計の考え方を基本に次の鉄鋼製造技術を適用して製造されている。

- (1) 製鋼での炉外精錬による高純度化技術
- (2) 熱間圧延における高精度制御冷却技術
- (3) 造管での高精度インラインシーム熱処理技術<sup>22)</sup>

このような高加工性高強度鋼管と高強度鋼管の曲げ加工性を確保する新しい曲げ加工技術である PRB 法を自動車足回り部品に適用することにより、自動車足回り部品 (Photo 3) として 780 MPa 級鋼管が世界で初めて採用された。

#### 4.2 実部品への適用例<sup>17)</sup>

##### 4.2.1 780 MPa 級薄肉電縫鋼管適用のフロントロアアーム

フロントロアアーム部品に高強度薄肉鋼管を適用した事例は公表されていない。780 MPa 級電縫鋼管を適用し、PRB 法を活用して、世界初のフロントロアアーム部品開発を行った。実用化したフロントロアアーム ( $\phi 70 \times t 2.6$  mm 適用) の外観を Photo 3 に示す。Table 2 にこの部品の適用効果を示す。本開発品は、薄板の一体プレス成形品と比較して、工程数が 72% 削減するなどの大幅な適用効果を示す。

##### 4.2.2 590 MPa 級薄肉電縫鋼管適用のトレーリングアーム

疑似 3 次的に複雑な曲がり形状を持つトレーリング

アーム部品の開発が必要となり、PRB 法を適用した疑似 3 次元曲げ加工技術の開発を行った。590 MPa 級高加工性電縫鋼管 ( $\phi 65 \times t 3.8$  mm) を適用し、実用化したトレーリングアームの外観を Photo 4 に示す。

## 5. 結言

自動車構造部品のさらなる軽量化・高剛性化を閉断面構造で達成するため、高強度薄肉鋼管の高効率曲げ加工技術として外径絞りをともなう PRB 法を開発した。さらに、複合 R 曲げ加工技術や疑似 3 次元曲げ加工技術の開発に展開することにより、590 ~ 780 MPa 級高強度鋼管を適用する複雑形状の自動車用アーム部品の新規開発と実用化を行った。

PRB 法を活用することにより、780 MPa 級までの高強度薄肉鋼管とそれらの異形断面管の曲げにおいて、回転引き曲げ加工法では不可能な小 R 曲げ加工、高い生産性、さらに熟練性を排除する調整の容易さを享受することができる。断面の扁平化が許容される曲げ加工材や THF のように後成形で断面形状を変化させるプロセスでは、回転引き曲げ加工法に代わり応用できる範囲は広く、その波及効果は大きいと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 真鍋健一. CAMP-ISIJ. 2003, vol. 16, p. 1158.
- 2) 古部俊明, 細谷佳弘. 塑性と加工. 2005-07, vol. 46, no. 534, p. 560.
- 3) 杉山隆司. 塑性と加工. 2005-07, vol. 46, no. 534, p. 552.
- 4) 橋本裕二, 鈴木孝司ほか. H16 年度塑加春講論. 2004, p. 291-292.
- 5) Schubert, Paul B. "Pipe and Tube Bending," The Industrial Press. 1953.

- 6) Fuchs, F. J. JR. The Bell System Technical Journal. 1959, vol. 38, no. 6, p. 1457-1484.
- 7) 山崎武一. 塑性と加工. 1969, vol. 10, no. 103, p. 618-620.
- 8) 松浦庄司, 横山功. 塑性と加工. 1987, vol. 28, no. 313, p. 123-127.
- 9) 日本塑性加工学会編. チューブフォーミング—管材の2次加工と製品設計—. コロナ社. 1992年10月刊.
- 10) 竹内雅彦, 二橋岩雄. 塑性と加工. 1998-10, vol. 39, no. 453, p. 1008.
- 11) W.-D. Franz. Springer Verlag Berlin/Gottingen/ Heidelberg, 1961.
- 12) 森茂樹, 小出孝幸. H5年度塑加春講論. 1993, p. 475-478.
- 13) 村田眞ほか. 塑性と加工. 1994, vol. 35, no. 398, p. 262-267.
- 14) Neugebauer, W.-G. et al. Advanced Technology of Plasticity. 2002, vol. 2, p. 1465-1470.
- 15) Tozawa, Y. et al. Annals of the CIRP. vol. 33/1, 1984, p. 175-178.
- 16) Tozawa, Y.; Ishikawa, T. Annals of the CIRP. vol. 37/1, 1988, p. 285-288.
- 17) 鈴木孝司, 上井清史, 佐藤昭夫, 上野行一, 岸本篤典, 岡田正雄, 弓納持猛. 第56回塑加連講論. 2005, p. 191-192.
- 18) 橋本裕二, 園部治, 鈴木孝司, 佐藤昭夫, 上野行一, 岡田正雄, 斎藤幸司. 第56回塑加連講論. 2005, p. 193-194.
- 19) 園部治, 橋本裕二, 鈴木孝司, 佐藤昭夫, 上野行一, 岡田正雄, 斎藤幸司. 第56回塑加連講論. 2005, p. 195-196.
- 20) 豊田俊介, 鈴木孝司, 佐藤昭夫. JFE 技報. 2004, no. 4, p. 28.
- 21) 高橋学. ふえらむ. 2002. vol. 7, no. 11, p. 80.
- 22) 澤木哲郎, 大橋仁磨, 佐藤昭夫, 郡司牧男, 藪本哲, 豊田俊介. CAMP-ISIJ. 2005, vol. 18, p. 1238.



鈴木 孝司



豊田 俊介



佐藤 昭夫



上野 行一



岡田 正雄