

論文・解説

30

## 高性能トーションビーム開発 Development of High Performance Torsion Beam

高橋 浩之\*<sup>1</sup>      桑子 俊\*<sup>2</sup>      川口 秀明\*<sup>3</sup>  
Hiroyuki Takahashi      Shun Kuwako      Hideaki Kawaguchi  
中土 信之\*<sup>4</sup>  
Nobuyuki Nakado

### 要 約

トーションビームアクスル形式（以下TBA）のセンタービームにおいて、車両運動性能を進化させるSmart Expand Beam（以下SEB）を開発した。SEBは周長可変によりねじり剛性、質量をそのままに曲げ剛性を大幅に高めるものである。鍛造技術をプレス加工に用い、管の外周と内周の弾性回復量の偏差を極小化することで、レーザー溶接に求められる接合部の間隙の精度を確保した。それにより、板曲げ溶接成形の生産性の良さと鍛造法での品質を確保しつつ、周長可変の形状を一般的な汎用設備で生産可能な素管の成形方法を確立させた。本稿では、その取り組み内容について報告する。

### Summary

On the center beam of torsion beam axle, Mazda developed "Smart Expand Beam" for improvement of the performance of vehicle dynamics. SEB increases bending stiffness of the center beam without increases of torsion rigidity and mass. Typical forging method was provided by stamping, the requirement of narrow gap for laser welding is achieved. Providing compression stress to all portions, difference of elastic removal both inside surface and outside could be minimalized. As the result, with satisfaction of high productivity by stamping, welding assembly and high quality of forging, the forming method of pipe with variable diameter was established by using popular facilities as follows.

### 1. はじめに

中～小型乗用車において軽量化と車両運動性能を両立させるためにTBAが広く採用されている。TBAは車両前後方向に配置され車体とタイヤをつなぐ左右のトレーリングアーム部と、車両左右方向に配置され左右のトレーリングアームをつなぐセンタービーム部からなるシンプルな構造であり軽量化に優れる。一方で、車両運動性能に対しセンタービームの剛性の寄与が大きく、センタービームをいかに設計するかで車両運動性能のポテンシャルが決まる。このTBAの運動性能進化を可能とするセンタービームの理想構造実現に向けて、開発部門、生産部門が一体となって技術開発を行った。

### 2. センタービーム理想構造の導出

#### 2.1 クラッシュドパイプ式センタービーム

センタービームの主要な機能として、①タイヤを支持する機能と②車両のロール姿勢を制御する機能がある。

①の機能には曲げ剛性を高く設定することが有効なためセンタービームとトレーリングアームとの結合部断面を大きくすることが有効であり、②の機能にはねじり剛性のある適切な値とする必要があるためねらいにあわせて車両中央部の断面を決める。また車両軽量化のために最高の質量効率でこれらの機能を実現しなければならない。

センタービームは鋼板の形状及び板幅を任意に変更することで各断面を成形した中実断面からなるものと、鋼管から形状を変更することで各断面を成形した中空断面からなるクラッシュドパイプ式と呼ぶものに大別される。後者は質量軽減に有効であり、マツダでは2014年9月発売の現行デミオからこれを採用している。

#### 2.2 高性能センタービーム

Fig. 1に現行デミオのTBAとSEBを用いたTBAの比較を示す。現行デミオのTBAに対し、SEBを用いたTBAはセンタービームとトレーリングアームとの結合部分の断

\*1 シャシー開発部  
Chassis Development Dept.

\*2~4 技術本部  
Production Engineering Div.

面前後幅を拡大している。

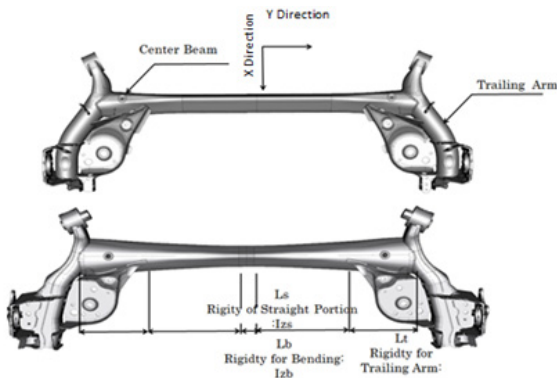


Fig. 1 Comparison of TBA between Conventional Straight and SEB

現行デミオのTBAの断面形状をFig. 2に示す。車両中央部の断面をつぶし切ること適切なねじり剛性を得ているが、使用している鋼管はその製造方法から均一周長の素管 (Straight Pipe) となるため、トレーリングアームとの結合部近傍の断面がStraight Pipeの周長で決まる形状となっている。

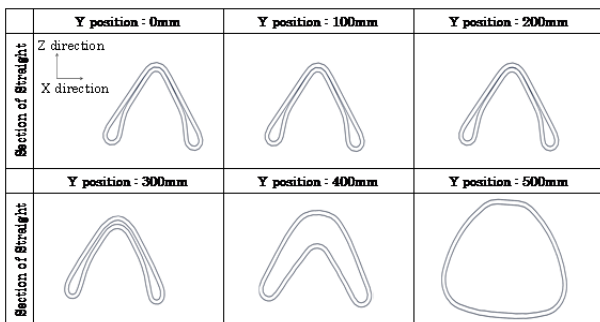


Fig. 2 Sections of Conventional Straight Beam

これに対してSEBを用いたTBAは、Fig. 3に示すように周長可変の素管によって車両中央部からトレーリングアームとの結合部の間の各部位で必要な断面を確保した形状としている。

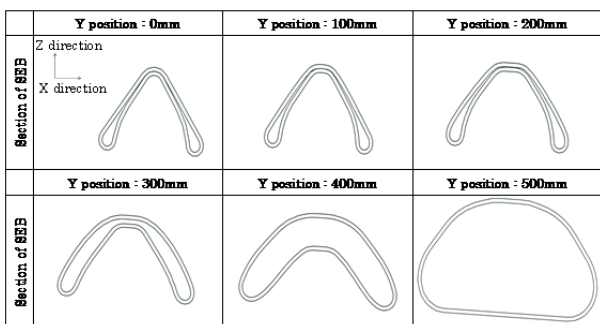


Fig. 3 Sections of SEB

Fig. 4にこれら二つのセンタービームの各部位のZ軸まわりの断面二次モーメントの比較を示す。両者はねじり剛性と、質量を同等としたものである。SEBではStraight Pipeに比して、トレーリングアームとの結合部分に向けて増加させることができている。結合部近傍ではおよそ150%増加できている。

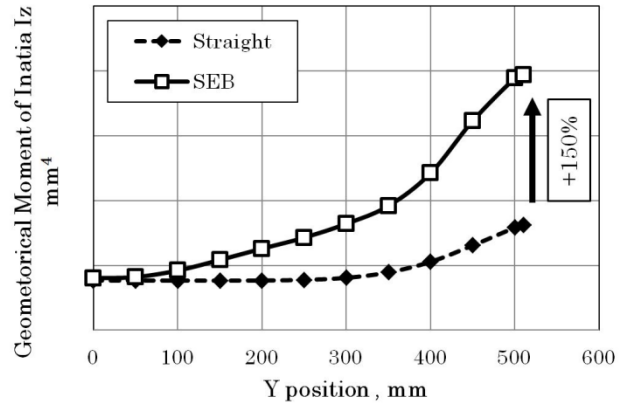


Fig. 4 Comparison of Geometric Moment of Inertia

このとおりセンタービームへ周長可変とした素管を用いることは性能及び軽量化への効果が大きく、このSEBの実現のために必要な造管技術を開発した。

### 3. SEBのための周長可変の素管の製法

#### 3.1 プレス加工による鋼板からの冷間鍛造パイプ成形

パイプ成形方法は大きく分けて、穿孔法に代表される鍛造による丸棒からの成形と、電縫鋼管のような鋼板から板を筒状に曲げ、溶接及び熱変形の矯正などの工程を経て製造される板曲げ溶接成形に分類される。それぞれ長所短所を持ち、用途に応じて選択使用されている。しかし二つの工法とも、同一パイプ内で径の変化を求めることはできない。

目指すべきは、板曲げ溶接成形の生産性の良さと鍛造法の品質を確保しつつ、周長可変の形状を一般的な汎用設備で生産可能な工法を開発し、グローバルな展開に対応することである(Fig. 5)。そのため生産設備は一般的なプレス機械であることが必要となる。

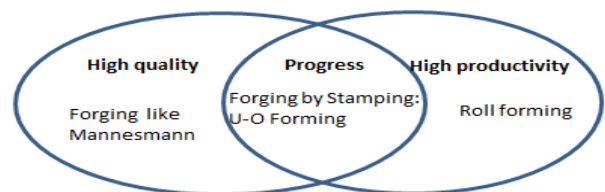


Fig. 5 Progress to Be Satisfied with Quality and Productivity

Fig. 6にロール成形の溶接前の無拘束の形状を再現した端面を示す。この状態からロールにより圧着され電気溶接されるのであるが、端面は開いており、ここを埋めるためパイプ自身を溶かしながら隙間を埋めている。これには大量の熱を必要とし、電気抵抗溶接もギャップ部分の体積補充のための入熱問題が問題となる。この大量の入熱は高張力鋼板のHAZ割れの原因となり、TiやVなどの元素の添加が必要となってくる。また凝固時の収縮により精度の変化が発生する。

そこで目指すべき溶接形態は端面完全密着と、その端面のみの溶解と凝固を可能とする溶接方法が必要である。そのため、成形は冷間鍛造の技術に、接合はレーザー溶接の技術に解を求め、端面の精度としては小野らがレーザー溶接の間隙に関して必要と述べている<sup>(1)</sup> 0.1mm程度以下を再現することとした。

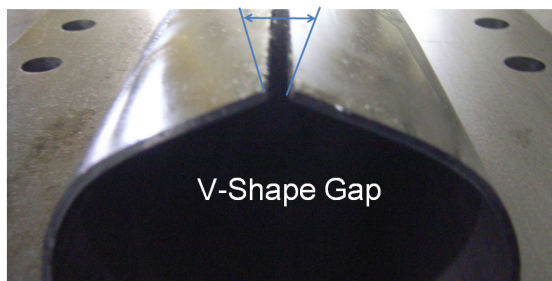


Fig. 6 V-Shape Gap of End of Pipe in Case of Roll Formed Pipe without Restraining Force

Fig. 7に一般的なパイプ成形の工程を示す。まず素板から所望の形状に切断し、その後U形状に成形する。その後、O形状の成形を施す。このプレス加工を以下、U-O成形と呼ぶ。このうち、溶接を施し素管となる。U-O成形における生産技術的に制御可能な因子は、O成形工程に至るまでの工法選択及びその形状の決定と材料寸法及び溶接方法及び条件の適正化である。

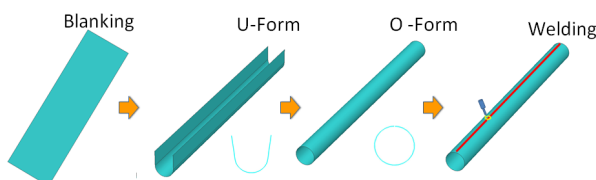


Fig. 7 Forming Process of Conventional U-O Forming

3.2 U成形後の予備曲げ成形に関して

従来の均一周長のU-O成形は単純曲げであり、U成形による弾性回復のみを考慮すればよいが、周長可変の素管の場合は弾性回復に加えて次の点を配慮する必要がある。

Fig. 8に直径の変化するU-O成形のパイプの展開形状を

示す。図中の斜線部は展開時の余肉であり、この部位が影響して変形の不均一を発生させる点。 $\rho_1$ ,  $\rho_2$ の曲率の変化する部位を持っている点。これら二つの要素が加わることで離形後の端部の位置は金型形状とは大きく異なる。この離形後の形状変化を制御する必要が生じる。形状制御の要件は、次のO成形のため端部がO成形工程の上型形状(=N)の内側に収まることである。これを実現するための前処理としてO成形工程の前に予備曲げ成形の工程を設ける。

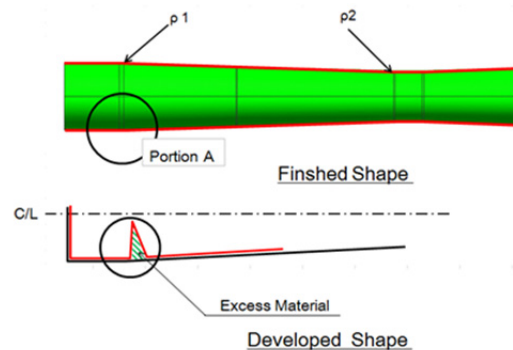


Fig. 8 Developed Shape from Pipe to Plane

3.3 冷間鍛造技術の適用によるギャップの解消

Fig. 6にロール成形の溶接前の無拘束の形状を再現した端面形状を示したが、通常の板曲げ成形でも同様な現象が発生する。Fig. 9に示すように外周部分は引張り応力が、内周部分には圧縮応力がかかる。離形後、この応力が解放されると図中、右のように弾性回復によりギャップが生じる。

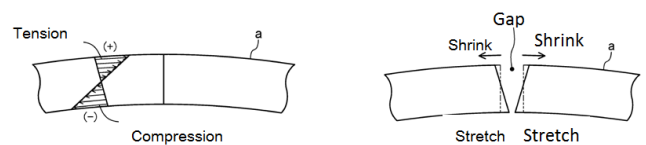


Fig. 9 Difference of Elastic Removal

ここでこのギャップのオーダーを確認する。板厚中心の直径 $2r=\phi 100$ 、板厚 $t=2.6$ として、外周のひずみは $t/2r$ で与えられ、2.6%となる。 $Y_p=600\text{MPa}$ の弾塑性体と仮定すると弾性回復のひずみは $\pm 0.29\%$ となる。すなわち外周側は周長全体ではおよそ $-0.9\text{mm}$ となる。内周側も同様に $+0.9\text{mm}$ となり、通常の曲げ成形ではレーザー溶接に求められる $0.1\text{mm}$ 程度の間隙を得ることができないことを示している。

そこで塑性変形後の弾性回復によるギャップを解消する手段として冷間鍛造としての圧縮による成形に解を求めた。すなわち素管周長より長い材料で成形し全圧縮を得ることである。この割合を幾何学的圧縮率(以下GC

ratio) と呼ぶ。Fig. 10にGC ratioの定義を示す。

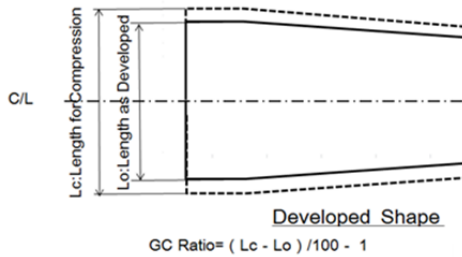


Fig. 10 Definition of Geometrical Compression Ratio

Fig. 11に全圧縮の変形経路を示す。板外側の変形は無負荷の状態から、 $\sigma_o$ まで引張りとなる。これで板内側の圧縮とあわせて負荷状態での円の形状は確保される。ここまではロール成形と同様であり、ロール成形はここで加工は終了する。一方、板内側の変形は、同じく無負荷の状態から $\sigma_i$ まで圧縮される。ロール成形では板外と同様、板内 $\sigma_i$ で成形を完了する。全圧縮ではこれより圧縮を進め板外側では $\sigma_{oc}$ に、板内側は $\sigma_{ic}$ に至る。これで全圧縮の成形は完了する。

以下離形後の応力と弾性回復の挙動を述べる。全圧縮の場合とロール成形とのひずみを比較する。ロール成形において、荷重除去後の $\epsilon_i$ と $\epsilon_o$ の弾性回復が生じる。板外、板内のひずみの偏差は $\epsilon_i + \epsilon_o$ となる。これに反して全圧縮U-O成形においては板外、板内ともに圧縮がかかっており、弾性回復の偏差は $\epsilon_{ic} - \epsilon_{oc}$ となり、この偏差は少ない。すなわち離形後の端面は平行に移動する。結果として塑性変形後のギャップが無視できるオーダーとなる。

加えて、この現象を応力の視点からみる。付与された板内、板外の応力の差は全圧縮をしていない場合 $\sigma_d$ となるが、全圧縮すると $\sigma_{dc}$ となる。結果として残留応力(=板内板外の応力差)も大幅に抑制される。

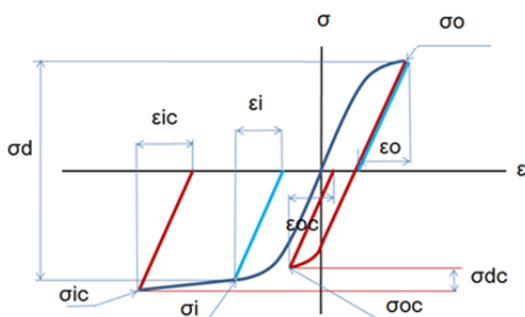


Fig. 11 Comparison of Historical Stress-Strain Curve between Pipe with and without Compression

### 3.4 実験・解析方法

Fig. 12に周長可変の素管形状を示す。中央部分に50mmの直線部を有し直径を拡大しつつ再び直線部へつ

ながる周長の変化を持たせた。

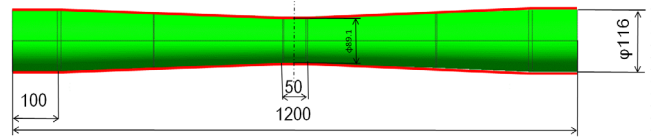


Fig. 12 Shape of Expand Pipe

Fig. 13に今回の実験の工程を示す。一般的なパイプ成形の工程に加えて3.2で述べた展開時の余肉と曲率変化部位の対策として予備曲げ成形工程をO成形工程の前に設けた。FEM解析にはPam-Stampを用いた。供試材は780MPa級高張力鋼板である。

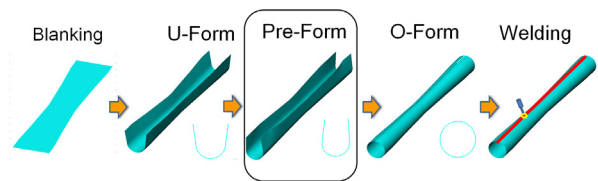


Fig. 13 Forming Process of Expand Pipe

Fig. 14にO成形の金型の下死点の状況を示す。芯金のない成形である。

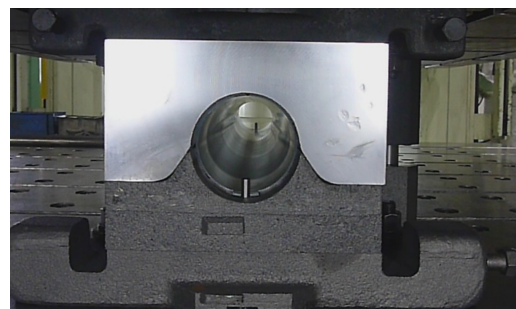


Fig. 14 Shape of O-Forming Die at Bottom Position

溶接はレーザー溶接で接合部の密着を確保するため左右から加圧する治具を用いた。レーザー溶接機は、ファイバーレーザー：6kWを使い、その溶接条件は、速度：2.4m/sec、照射径：0.6mm、出力：4kW、アシストガス：Ar (30L/Min.)とした。

### 3.5 予備曲げ成形の結果

Fig. 15にU成形品と予備曲げ品の比較を示す。O成形のためにはU成形の端部の幅Aが、O成形工程の上型形状(=φ)幅Cの内側に収まる必要がある。(a)の幅Aは予備曲げ成形により、(b)の幅Bまで成形されておりO成形の要件である幅C以下の形状が得られた。本実験では780級高張力鋼板が供試材であるが、さらなる高強度材の利用と、周長変化率のより大きい周長可変の素管成形には、予備曲げ形状の精度向上が必要である。

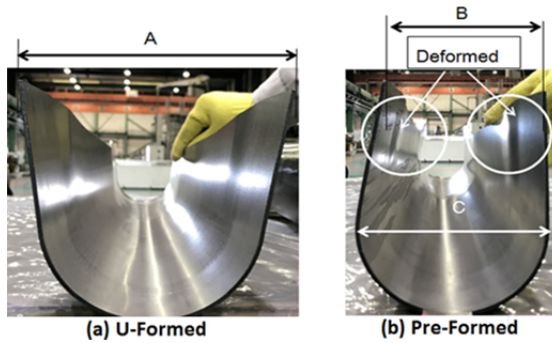


Fig. 15 Shape of U-Formed and Pre-Bended

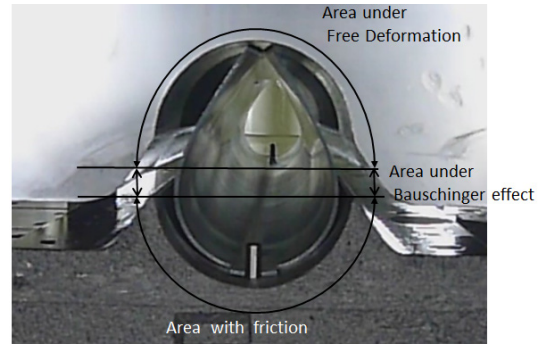


Fig. 18 Effect of Friction and Bauschinger Effect

3.6 O成形の結果

Fig. 16にパイプ成形後の板厚分布の実験とFEM解析の比較を示す。実験はGC ratio 1, 1.5, 2, 3%で行った。実験とFEM解析は良い一致を示している。

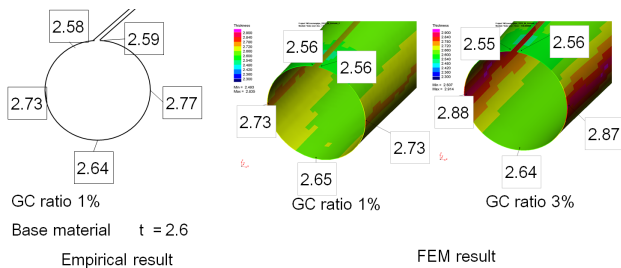


Fig. 16 Comparison of Thickness between Empirical and FEM Result

Fig. 17にGC ratio 1.5%のひずみ分布を示す。数値は主ひずみの値で、+の線長で大きさと方向を示す。

ここで上部（以下地球儀になぞらえて北極と呼ぶ。）では圧縮のひずみが周方向に発生しているが、ほぼ同等のひずみが長手方向に発生している。この部位は他の部位と境界条件が異なり長手方向への拘束は材料の接触部分の摩擦力だけであり、他の部位に比して自由に長手方向に伸びたものとする。これは塑性変形のしやすさを示し、生産技術的な形状の付与の可能性を示す。

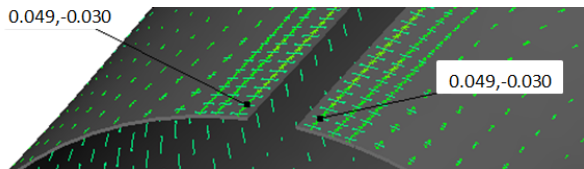


Fig. 17 Effect of Deference of Boundary Condition

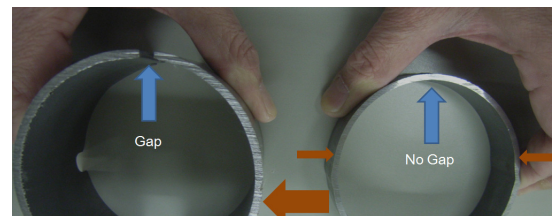
また、赤道部分の板厚増加は顕著である。南半球は金型との摩擦があり北半球成形時の加圧力の法線方向の力\*摩擦係数分の拘束を受け材料は変形しづらい。赤道部分はバウシンガー効果の影響で変形が促進されたものとする。O開始直前の金型との接触状況をFig. 18に示す。

Table 1にGC ratioを変えた場合のひずみの比較を示す。圧縮率に比例してひずみ量は増えるが、その変化は赤道部分で最大で、主に南半球のひずみ増加となり、北半球のひずみ量はほぼ同じであることが分かる。また、780級の材料は0.3%のひずみで塑性域に入りますが、周長可変の素管形状の場合GC ratio 1%でも全域圧縮の塑性域に入っていることが分かる。これはFig. 8で示した材料の展開時の余肉を成形させたことによるものと考えられる。Fig. 18で示したように芯金のない成形であるためGC ratio 3%を超す圧縮を与えると座屈が発生した。幾何学的形状と縦弾性係数で決まる座屈強度と圧縮力で座屈発生の有無は決まる。780MPa級の高張力鋼板は引張り強さ780MPaを下限保証するものであるが、座屈に対して表裏の応力差の影響を考慮する必要がある。

Table 1 Effect of Geometrical Compression

Portion	GC ratio	1%	1.5%	2.0%
The North Pole	outside	-2.9	-2.2	-2.2
	inside	-6.1	-5.7	-5.9
The equator	outside	-3.1	-6.5	-7.1
	inside	-7.6	-11.9	-12.6
The South Pole	outside	-1.5	-1.5	-1.5
	inside	-3.3	-4.1	-4.3

Fig. 19にO成形品とロール成形品の断面の比較を示す。O成形品は人力で加圧することで密着を得ているが、ロール成形品は人力では密着を得られない。





(a) just Formed (b) Form with Compression

Fig. 19 Comparison of Shape of Rolled and Forged

Table 2に密着に必要な荷重の比較を示す。

Table 2 Compression Force to Make Ring without Gap

	Required Compression Force to Gap 0	Section
as Formed	200kN/m	
Formed with Compression	less than 2kN/m	

全圧縮の場合でも板内板外の応力差が生じるため、無拘束での完全密着は得られないが、軽微の拘束力であることの確認のために密着に要する荷重を測定した。これはGC ratio 2%の結果で、密着に必要な荷重は単に曲げたものの1/100以下であり、長さ1mあたり2kN以下の外力で型内状態の密着を再現できる。

Fig. 20に板面内の硬度分布を示す。通常の曲げ加工では中立軸である板厚中央の硬度が低く、板厚表面において硬度が上昇する。しかし全圧縮のため全ての領域で硬度が上がっており、加えて板外側の硬度が板内側に比べて低い。これは板外側が初めに曲げ加工で引張りの後、圧縮を受けたことで、板内に比べて圧縮側の硬度より低くなったと考えられFig. 11の変形経路の正しさを示す。

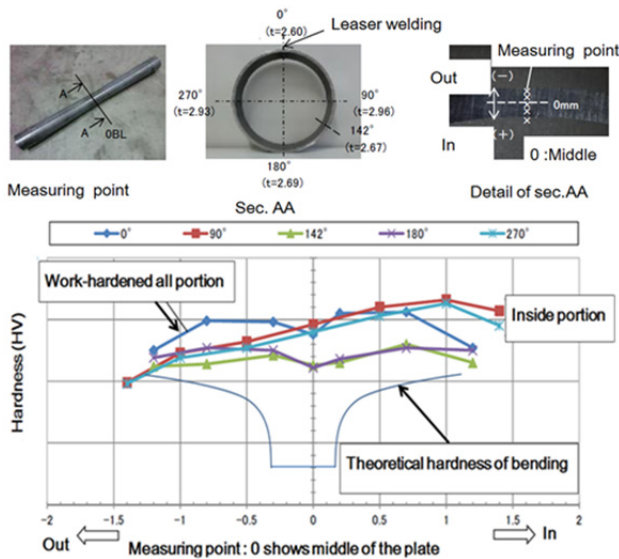


Fig. 20 Hardness Distribution

以下、型内で完全密着した周長可変の素管の溶接治具での挙動について述べる。圧縮の後、ほぼ均一に弾性回復するという事は、板の内外の応力差が少ないことである。すなわちFig. 11で示した $\sigma_{dc}$ が小さくなることである。切り出し法による残留応力の大きさを確認した。Fig. 21に測定部位と残留応力値を示す。ロール成形のパイプの残留応力は板内側が70MPaの圧縮、板外側が130MPaの引張りの残留応力があるのに対して、U-O成形の場合どの部位でも一桁少ない。すなわち板外板内と

も同様に弾性回復していることが分かる。Fig. 19で示したとおり人力で型内密着状態を再現できることが納得できる。

溶接治具内においても、2kN/mの拘束力を与え、型内と同じ状況が再現されていることを確認した。

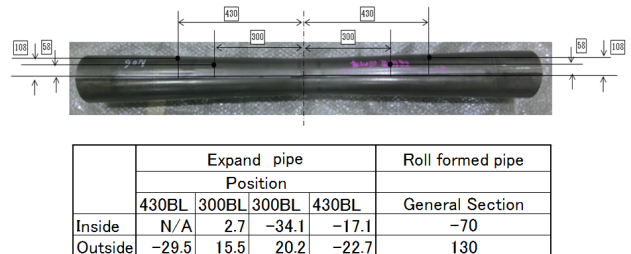


Fig. 21 Residual Stress

3.7 溶接後の精度と品質

JIS G 3445規格の直径の寸法公差によると、区分3号外径100mm以上の場合、外径の許容差は $\pm 0.5\%$ である。両端の直径を測定すると、 $\phi 116.31\text{mm} \sim 116.66\text{mm}$ であった。金型は弾性回復による圧縮応力除去後の直径の拡大は配慮せず $\phi 116$ で製作した。弾性回復により直径0.3mmの拡大が確認された。弾性回復を考慮して金型製作をすれば $\pm 0.2\%$ 以下の周長可変の素管が得られることが分かった。また厚さに関しては、板の8%が許容差である。これに対してMax.2.77 mm, Min.2.59mmであった。これは $\pm 4\%$ に相当する。素板2.56mmであったので圧縮による板厚増加を考慮した設計が必要がある。

JISでは、鋼管の試験として、曲げ試験とへん平試験を挙げている。SEBにおけるクラッシュド成形を考慮して、へん平試験とV形状に潰す試験の二つでの評価を行った。へん平試験では、接合部以外の亀裂を確認した。V形状に潰す試験では、周長可変の素管場合、亀裂は発生せず良好な結果を示した (Fig. 22)。電縫鋼管よりも優れていることが分かる。

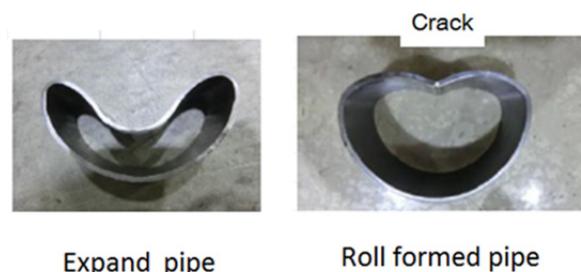
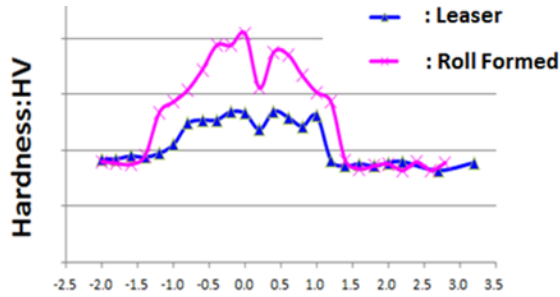


Fig. 22 Compression Test by U-Shape Tool

Fig. 23に溶接部の硬度及びその分布を示す。電縫鋼管に比してレーザー溶接は、硬度の上昇も低く、熱影響部の幅も狭い。



Measuring point:1mm inside of the outer edge

Fig. 23 Hardness Distribution of Welded Section

溶接部の組織観察をFig. 24に示す。針状のマルテンサイトの発生が観察され、その密度は電縫鋼管のほうが高い。硬度差はマルテンサイト量の違いと考えられ、エネルギー密度の高いレーザー溶接の優位性を示している。

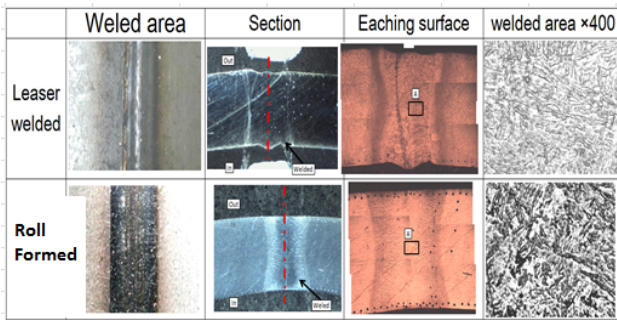


Fig. 24 Compression of Etching Surface

Fig. 25に溶接部の断面を示す。溶接部は入熱の多い場合に見られるワイングラス状ではなく、高速送りで発生するアスペクト比の高い杭形の形状を示している。これは溶接条件が適正であることを示す。

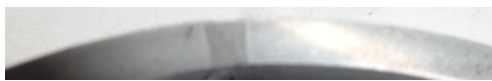


Fig. 25 Shape of Welded Section

Fig. 26は、0.1mmの間隙を設けて溶接したものである。通常のレーザー溶接ではひげが発生するが、この対策として金属をフィラーとして補う方法がある。Fig. 17で示した北極部の材料挙動を活用し、不足分を板厚増加させることで、Fig. 27の形状を得ることが可能となり0.1mmの間隙でも必要な断面を得ることができた。

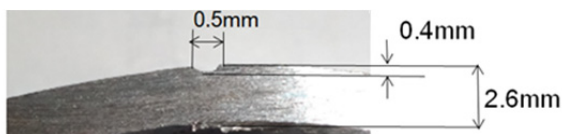


Fig. 26 Section of Intentionally 0.1mm Gap Provided

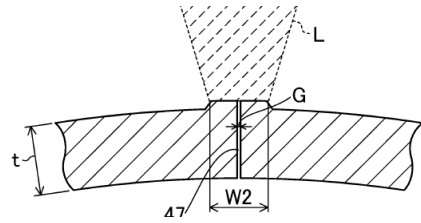


Fig. 27 Method to Provide Extra Volume of Material

#### 4. 結論

本研究でトーションビームに供するSmart Expand Beamの性能とその生産の可能性を示した。

- 1) ねじり剛性、質量を同等としながら曲げ剛性を大幅に向上させるTBA用センタービームを実現した。
- 2) 全圧縮による型内完全密着は可能であり、離形後の弾性回復量のパイプ内外の偏差を最小化する幾何学的圧縮率を見出した。
- 3) 間隙に生ずる不足体積が溶接品質に影響を及ぼすため、安定的な溶接品質を確保するための断面形状と溶接可能な間隙を見出した。

#### 5. おわりに

この開発にあたり試験、計測等のご協力をいただいた(株)ワイテック様に謝意を表す。

#### 参考文献

- (1) 小野ほか：レーザー・アークハイブリッド溶接技術，NKK技報，No.176，pp.70-74 (2002.3)

#### ■ 著 者 ■



高橋 浩之



桑子 俊



川口 秀明



中土 信之