
CBR 成形ミルによる高加工性薄肉電縫鋼管

High-formability Thin Walled ERW Pipe for Automobile, Produced by CBR Forming Mill

豊岡 高明 (Takaaki Toyooka) 橋本 裕二 (Yuji Hashimoto) 郡司 牧男 (Makio Gunji)

要旨：

自動車排気ガスシステム用パイプのステンレス化に対応するため、川崎製鉄では、新しいロール成形フラワーの設計に基づく CBR (chance-free bulge roll) 成形ミルを開発し、高品質で 2 次加工性に優れたステンレス電縫鋼管の製造を可能とした。本ミルにおいては、低ひずみ造管により材料の加工硬化を抑制し、未焼鈍パイプの 2 次加工特性を従来成形法の製品に比べて大幅に向上した。また、溶接におけるガスシールド技術とフィンパスロールでの新しい張り出しロール成形法の適用により高周波電縫溶接部の高品質化を達成した。さらに、従来成形ミルでは、成形が困難であった肉厚 5 0.6 mm クラスの極薄肉ステンレス電縫鋼管の安定製造を可能とした。

Synopsis：

Applications of stainless steel and aluminum to automotive parts for lighter weight and higher durability have been increasing. In particular, to respond to the tendency of using stainless steel for automotive exhaust pipes, Kawasaki Steel has developed a new forming process and a mill. This mill was termed CBR (chance-free bulge roll) forming mill that adopts a new design of a roll flower pattern. High quality ERW stainless steel pipe, which has excellent formability and high quality of welded seam, has been satisfactorily produced by this mill. These high performances were accomplished by small strain forming of a strip sheet, a gas shielding technique of electric resistance welding and a new roll forming process without lubrication. Furthermore, the stable production of ultra thin walled stainless steel pipes such as those of wall-thickness of 0.6 mm has also been achieved.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

High-formability Thin Walled ERW Pipe for Automobile, Produced by CBR Forming Mill



豊岡 高明
Takaaki Toyooka
技術研究所 鋼管・鋳
物研究部門長



橋本 裕二
Yuji Hashimoto
技術研究所 主任研究
員(掛長)



郡司 牧男
Makio Gunji
知多製造所 溶接管・
鋳造部溶接管技術室
主査(課長補)

要旨

自動車排気ガスシステム用パイプのステンレス化に対応するため、川崎製鉄では、新しいロール成形フラワーの設計に基づく CBR (chance-free bulge roll) 成形ミルを開発し、高品質で 2 次加工性に優れたステンレス電縫鋼管の製造を可能とした。本ミルにおいては、低ひずみ造管により材料の加工硬化を抑制し、未焼鈍パイプの 2 次加工特性を従来成形法の製品に比べて大幅に向上した。また、溶接におけるガスシールド技術とフィンバスロールでの新しい張り出しロール成形法の適用により高周波電縫溶接部の高品質化を達成した。さらに、従来成形ミルでは、成形が困難であった肉厚 = 0.6 mm クラスの極薄肉ステンレス電縫鋼管の安定製造を可能とした。

Synopsis:

Applications of stainless steel and aluminum to automotive parts for lighter weight and higher durability have been increasing. In particular, to respond to the tendency of using stainless steel for automotive exhaust pipes, Kawasaki Steel has developed a new forming process and a mill. This mill was termed CBR (chance-free bulge roll) forming mill that adopts a new design of a roll flower pattern. High quality ERW stainless steel pipe, which has excellent formability and high quality of welded seam, has been satisfactorily produced by this mill. These high performances were accomplished by small strain forming of a strip sheet, a gas shielding technique of electric resistance welding and a new roll forming process without lubrication. Furthermore, the stable production of ultra thin walled stainless steel pipes such as those of wall-thickness of 0.6 mm has also been achieved.

1 緒 言

近年、経済性および環境問題の観点より、自動車部材の軽量化と耐久性向上を目的に、ステンレス化およびアルミ化が急速に進んでいる。特に、排気ガスシステム用部品であるエキゾーストマニホールドでは、従来の鋳造品に代りステンレス溶接鋼管品の適用が増えている。エキゾーストマニホールドは狭いエンジンルーム内に配置されるため、曲げ、拡張など厳しい加工が行われる。したがって、鋼管の 2 次加工性が高温強度、耐酸化性と並んで重要な特性となる。

当社では、エキゾーストマニホールド用ステンレス電縫鋼管の造管時の付加的成形ひずみを低減して高い 2 次加工性を得るとともに、厳しい 2 次加工に耐える溶接品質を確保し、造管後の熱処理を省略して製造コストの削減を図ることのできる電縫鋼管の新成形ミル「CBR (chance-free bulge roll) 成形ミル」を開発、実用化した。本ミルでは、1 セットの成形ロールで多くの管サイズに兼用でき小ロット生産への対応をも可能にしている。

本報告では、CBR 成形ミルにおける成形および溶接プロセスの特徴と本ミルで製造したステンレス電縫鋼管の溶接部の特性および

2 次加工性について述べる。

2 電縫溶接部品質に対するロール成形の役割

電縫鋼管の実生産においては、品質のつくり込み、ならびに操業の安定化を足した上でロールの兼用化を考えることになる。しかし、一般的にロールの兼用化と電縫溶接部品質の確保および操業の安定化は、表裏的な関係にあり、その両立は難しい。帯板のロール成形と電縫溶接とを結び付けて研究した報告¹⁾は少ない。

そこで、電縫鋼管のロール成形の目的は何かを改めて検討する。電縫溶接までの上流過程のロール成形は、まず、健全な溶接品質と安定したビード切削を達成するために行われ、さらには良好なパイプ形状を得るために行われる。溶接直前までのロール成形の役目から考えると、外径寸法の変更に対してロールを兼用するということは、それぞれの管サイズに最適な曲げ形状から遠ざかる方向に成形がなされるわけで、ロール兼用化^{2,3)}を図っても、いかに溶接品質の低下を防止するかが重要な管理項目となる。特に、帯板エッジ部の成形は溶接品質への影響が極めて大きいため、重要である。

川崎製鉄では、健全な電縫溶接品質と安定したビード切削を得るために、適正な溶接部のエッジ成形形状を検討した⁴⁾。Fig. 1 に示すように溶接部近傍で、帯板両エッジプロフィルの長手方向になす

* 平成11年12月7日原稿受付

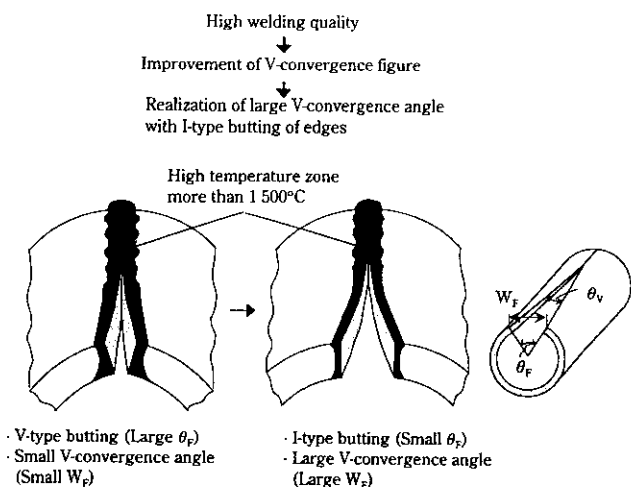


Fig. 1 Effect of V-convergence figure of edges on edge heating condition in high frequency electric resistance welding

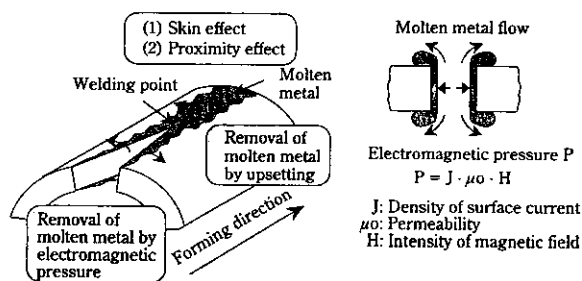


Fig. 2 Welding phenomena in high frequency electric resistance welding of pipe

角度（以下、V 収束角度）を大きくし、かつその状態で横断面からみてエッジ端面が平行な I 形の突き合わせとなるように帯板エッジ部を成形することが、溶接品質を安定化させる上で重要である。

電線溶接では溶接入熱が過大になるとエッジ部端面の溶融と短絡により溶接点が周期的に移動する現象に移行し、ペネトレータなどの溶接欠陥が多発する傾向があるが、V 収束角が大きいとこの欠陥の発生を抑制できる^{1,5)}。また、V 収束角度が大きいと接合点近くの狭い領域での短時間のエッジ加熱となり、酸化物の生成が減少する。さらにエッジに流れる高周波電流密度も増加し、Fig. 2 に示すようにエッジ端面に作用する電磁的圧力⁶⁾が増大するため、エッジ端面の酸化物を含む溶鋼が外部に排出されやすくなる。特にステンレス鋼は、融点が低く電気抵抗が大きいので低い電流で溶け、溶融エッジ端面に作用する電磁力が小さく、また、溶鋼の表面張力が大きく凝集しやすいなどの理由により、Fig. 3 に示すように両エッジ間で短絡が生じやすい。V 収束角度が小さいとこの短絡が生じやすく溶接が不安定になる。

横断面形状においてエッジ両端面が平行で I 形に突き合わせれば、Fig. 1 に示すようにエッジ板厚方向の均一加熱が行われ、スクイズ時のアプセット力も板厚方向に均一に分布し、ビード形状も内外面に均等に形成され、安定したビード切削が可能になる。

また、ステンレス鋼は、Cr などの酸素との親和力の強い元素を含むため、ペネトレータ欠陥が発生しやすい。したがって、溶接雰囲気⁷⁾の露点⁸⁾が上昇し溶接品質に悪影響を及ぼすと考えられるロール成形プロセスでの潤滑剤の使用はできるだけ避けたい。この場合、潤滑剤を用いず造管した場合はロール疵の抑制が課題となる。

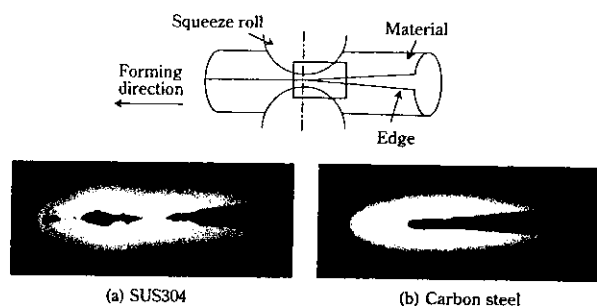


Fig. 3 Temperature distribution of stainless and carbon steels at V-convergence figure statically heated by high frequency electric current

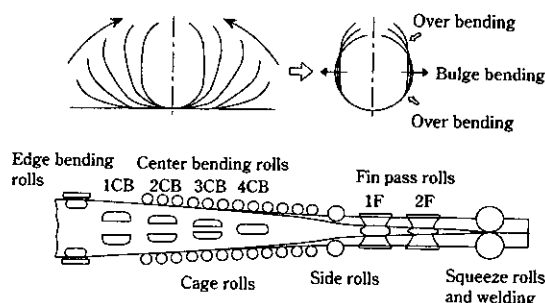


Fig. 4 Forming flower and mill layout of CBR forming process

以上のようにステンレス電線鋼管の溶接部の品質を高度に安定させるためには、I 形突き合わせで V 収束角度を大きくすること、無水・無潤滑での造管が重要と考えられる。

3 CBR 成形法の概要

3.1 成形プロセス

Fig. 4 に、CBR 成形法⁹⁻¹⁰⁾における素管の曲げ形状（成形フラワー）とレイアウトの概要を示す。エッジベンドロールにより帯板両エッジ部をあらかじめ成形した後、センターベンドロールとケージロールとにより帯板中央部を曲げ成形して縦長の小判形の素管を作る。次いで、フィンパスロールにて、管円周方向の 4 ケ所をいったんオーバーベンドした後に縦径を圧縮することにより管サイド部の張出し成形とオーバーベンド部の曲げ戻し成形を行い円形素管に仕上げることを特徴とする。したがって、従来の帯板全体を徐々に円弧に曲げていくいわゆるサーキュラーベンド方式と異なる。

CBR 成形法では、前章で説明した健全な溶接部品質を得るための V 収束角度を大きくし、かつ、I 形の突き合わせを実現するため、フィンパス成形での素管の曲げ形状を、Fig. 5 に示すように第 1 フィンパスロール (1F) においてエッジ部とサイド部の中間部を製品曲率以上にオーバーベンドして、エッジを倒し込みフィン角度 (θ_F) を小さくした。これによって、エッジの I 形化を可能とし、かつ、素管サイド部は曲げの抑制を行った小判形の成形形状とした。この工夫により後続の第 2 フィンパス (2F)、第 3 フィンパス (3F) において、この小判型の素管を上下方向から圧下することにより、素管サイド部を張り出すように曲げ成形して円形に成形する。そしてこのような成形によってエッジの I 形突き合わせを保ちながらエッジの開口幅を従来成形法のように狭めることなく大きな V 収束角度を実現することを可能としている。

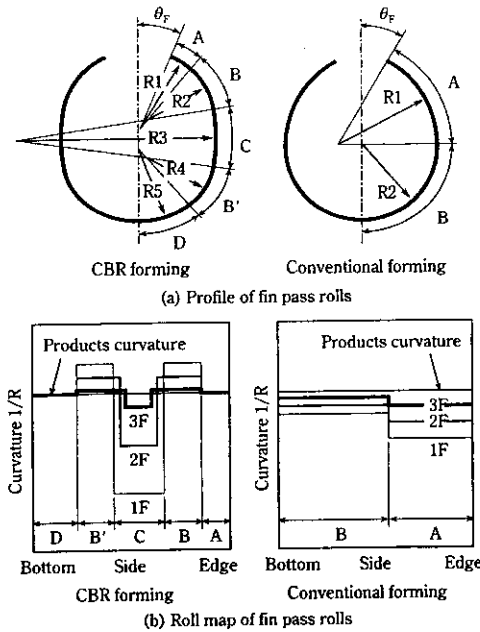


Fig. 5 Profile of fin pass rolls of CBR and conventional forming process

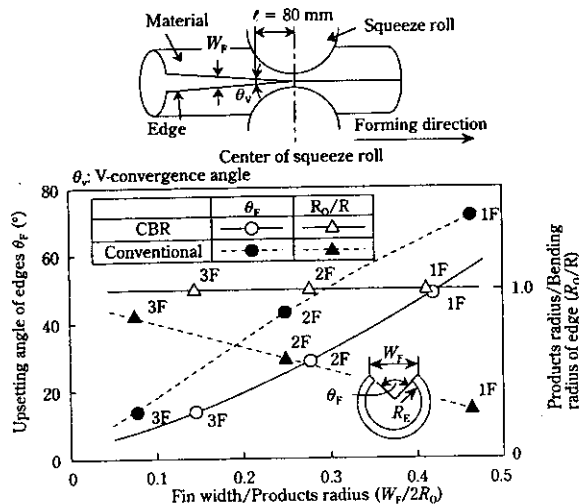


Fig. 6 Relationship among fin width W_F , upsetting angle of edges θ_F and bending radius of edge R_E

Fig. 6 には、一般的な従来成形法と CBR 成形法のフィンパスロールにおけるロール設計、すなわちフィン幅 (W_F) とフィン角度 (θ_F) およびエッジ曲げ半径 (R_E) との関係と比較して示す。CBR 成形法では、エッジ部を従来成形法より小さな曲げ半径に曲げた状態で、同一の W_F に対し θ_F を従来成形法より小さくすることができ、電縫溶接に有利なエッジ形状を成形することができる。また、Fig. 7 には、上述の CBR 成形法のフィンパス成形における素管の立体成形形状を従来成形法のそれと比較して示す。

3.2 ロール疵の抑制方法

Fig. 8 に、CBR 成形ミルのセンターベンドロール (CB ロール) における帯板の成形断面形状の模式図を、従来のブレイクダウンのそれと比較して示す。CBR 成形ミルでは、ケージロールでエッジ部を拘束するため、下 CB ロールは帯板中央部のみ接触すればよい。

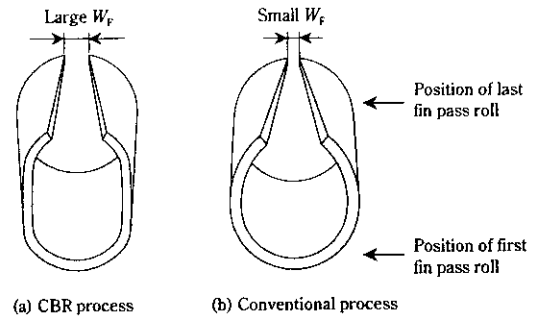


Fig. 7 Edge opening width W_F at last fin pass roll in CBR and conventional forming processes

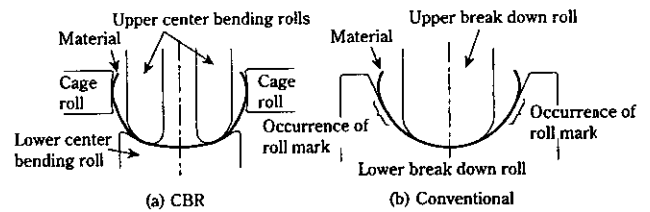


Fig. 8 Forming rolls construction at center bending stage in CBR and conventional forming mills

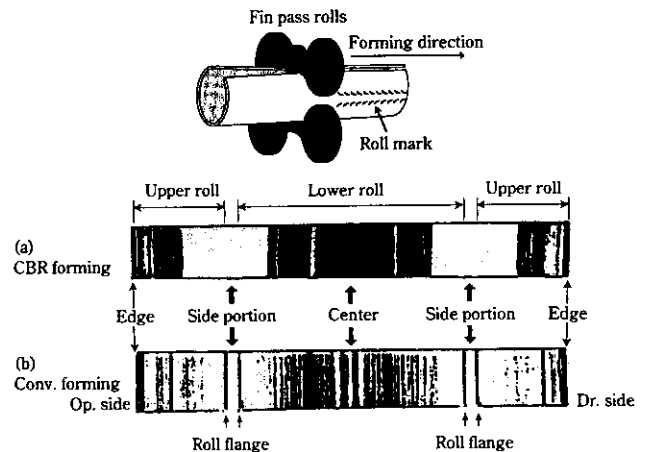


Fig. 9 Contact pressure distribution state between sheet and first fin pass rolls measured by pressure detective film sensor paper

したがって、下 CB ロールはロール幅が狭くでき、溝底部とフランジ部とのロール周速差が小さくなるためロール疵の発生が抑制される。一方、従来のブレイクダウンロールでは帯板のエッジ部近くまでロールで拘束するため、ロール周速差が大きくなりロール疵が発生しやすい。

次に、フィンパス成形におけるロール疵の危険性についても検討する。Fig. 9 に 1F における素管と材料の接触状態を感圧紙を用いて測定した結果を示す。従来成形法では、ロールと帯板との周速差が最も大きな位置すなわちロールフランジ部近傍において接触圧力が高いためロール疵が発生しやすい。CBR 成形法では、この部位の接触圧力は小さく、接触圧力が最大となる位置がオーバーベンド側にずれるのでロール疵は発生しにくい。両者の差はロールフラワーの違いによるものである。さらに、実機ミルにおいては、小判形のカリバー形状を有するフィンパスロールを分割ロール構造にする

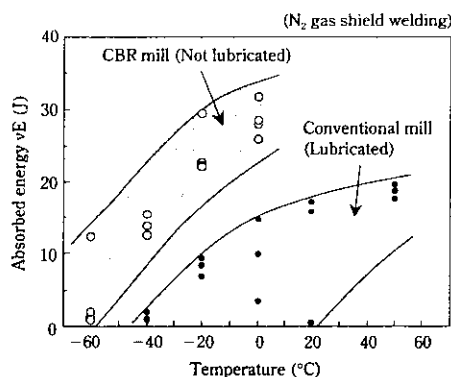


Fig. 10 Comparison of welded seam toughness of ERW stainless steel pipes produced by CBR and conventional mills (SUS436J1, $\phi 38.1 \text{ mm} \times t 2.0 \text{ mm}$)

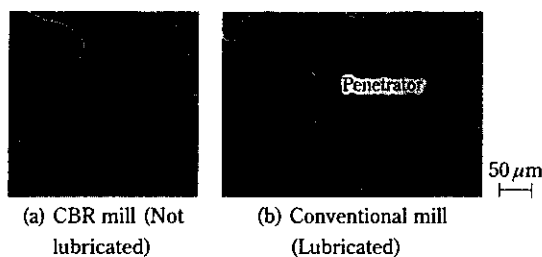


Photo 1 Comparison of SEM fractographs of Charpy impact test specimens of ERW stainless steel pipes produced by CBR and conventional mills (SUS436J1, $\phi 38.1 \text{ mm} \times t 2.0 \text{ mm}$)

ことにより、完全無潤滑下でのロール疵の防止を達成した。

3.3 高精度ロールセットアップ技術

各成形スタンドの圧下機械系には、エアシリンダーによる機械のバックラッシュ吸収機構あるいは、ボールネジを採用し、ロードセルおよびロール位置センサーを装着した。これらのハードを活用し、所定プリロードをかけた状態で高精度な圧下位置のプリセットを可能とした。

4 排気ガス用ステンレス電縫鋼管の品質特性

4.1 電縫溶接部の品質

溶接部の靱性に及ぼすロール潤滑の影響をシャルピー試験により調査した結果を Fig. 10 に示す。潤滑を行ったサンプルは当社従来ミルで製造したものであり、潤滑剤に水溶性のソリブル油を用いた。図より、無潤滑材は潤滑を行ったサンプルに比べ溶接部の靱性が優れることがわかる。Photo 1 に、SEM で観察したシャルピー試験片の破面を示す。潤滑を行ったサンプルの破面には、不活性ガス雰囲気中で溶接したにもかかわらず Cr 系の酸化物が多く認められた。これは、潤滑剤中の酸素と Cr が結合したためと考えられる。無潤滑材では破面に酸化物はなく、健全な溶接部品質が得られている。

Fig. 11 に溶接温度と偏平試験における溶接部の割れおよび分割工具による機械式拡張試験による拡張率の関係を示す。CBR 成形法は、溶接欠陥の発生しない適正な溶接温度範囲が当社従来ミルに比べて約 2 倍の 200°C に拡大し、製品全長にわたり溶接品質の安

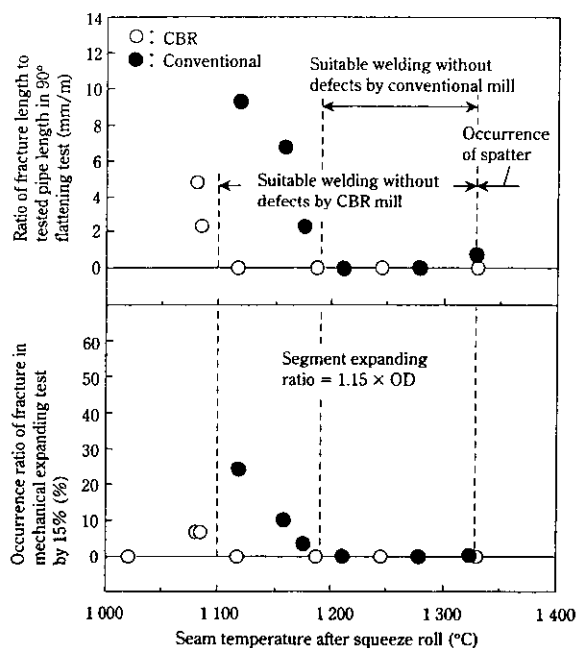


Fig. 11 Relationship between welding temperature and welding qualities by mechanical expanding test and flattening test of pipes produced by CBR and conventional mills (SUH409L, $\phi 42.7 \text{ mm} \times t 1.5 \text{ mm}$)

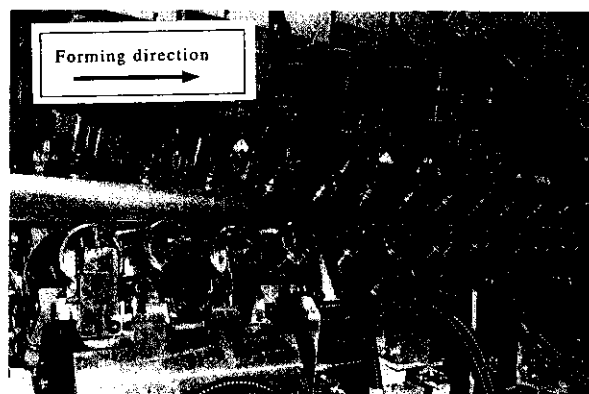


Photo 2 Appearance of strip sheet in cage roll forming zone of CBR forming mill

定化が図れた。これは、前節で述べた成形条件の適正化および安定化の結果と考えられる。

4.2 材料の加工硬化の抑制

CBR 成形ミルにおけるケージロール成形域の素管の変形形状を Photo 2 に示す。写真は材料が中止めの状態の上センターベンドロールスタンドを取り外し撮影したものである。CBR 成形ミルでは、ケージロール成形方式を採用し、帯板のエッジ部を短い間隔で多くのロールで拘束することにより、長手方向断面において滑らかな形状に変形させて帯板への付加的ひずみを必要最小限に抑えたこと、また、張出し成形の適用によりフィンパス工程以降の管周長の絞り量を従来の $1/2$ 以下に減少させることにより、造管時の材料の加工硬化を抑制した。従来ブレイクダウンミルと CBR 成形ミルにおいて、直径 38.1 mm 、肉厚 1.5 mm の鋼管に成形する途中過程の帯板から試料を採取し機械的性質を調べた。一様伸びの変化を Fig. 12 に示す。従来ブレイクダウンミルでは、溶接のスクイズロール後で

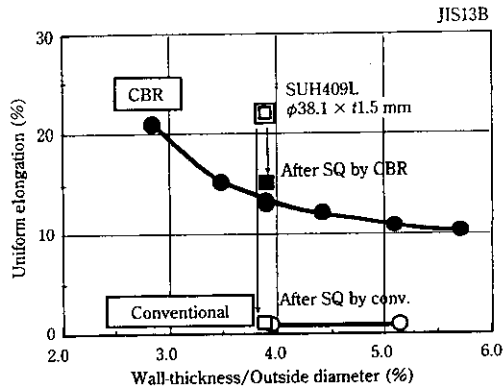


Fig. 12 Improvement of uniform elongation of stainless steel ERW pipe by CBR forming mill

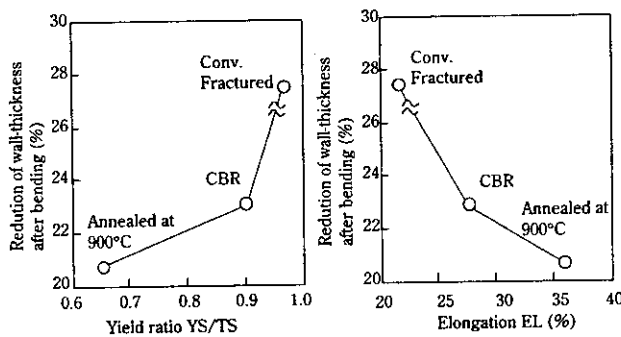


Fig. 13 Relationship between mechanical properties and bending formability (Material: SUS436J1, $\phi 38.1 \text{ mm} \times t 2.0 \text{ mm}$, Tensile test: JIS13B, Longitudinal direction, Bending: bending radius 40 mmR, bending angle 90°)

一様伸びがほとんど零になっているのに対し、CBR 成形ミルでは 12.5% の高い一様伸びを保持している。

4.3 製品の 2 次加工特性

CBR 成形ミルを用いた低ひずみ造管技術により、造管ままの未焼鈍パイプの 2 次加工特性が従来成形法の製品に比べて大きく向上した。

回転引曲げ方式により曲げ半径 = $1.0 \times$ 管外径に 90° 曲げ加工した場合の最大減肉率は造管方法による機械的性質の差と対応させて Fig. 13 に示す。高温強度、高温耐食性を確保するための成分系 (17%Cr-0.5%Mo-0.4%Nb) の SUS436J1L 鋼は、一般には加工性が悪いが、CBR 成形材では従来成形法の焼鈍材なみに曲げ部の減肉を抑えることができ、極めて厳しい曲げ加工も可能になり、材料コストの低減に繋がる。

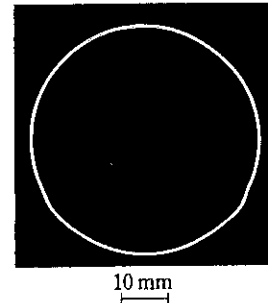


Photo 3 Cross section of ultra thin wall-thickness ERW stainless steel pipe produced by CBR mill (SUS436J1, $\phi 38.1 \text{ mm} \times t 0.6 \text{ mm}$)

4.4 極薄肉パイプの製造

従来ブレイクダウンミルでは、長手方向の断面形状が急激に変化するために、帯板エッジ部に縁伸びと呼ばれる過大な伸びが生じ、薄肉材ではエッジバックリングの発生を招いていた。CBR 成形ミルでは、従来ブレイクダウンミルでは成形が困難であった肉厚 0.6 ~ 0.8 mm、外径 42.7 mm の極薄肉鋼管も成形が可能となり生産実績もある。Photo 3 には、板厚 0.6 mm、外径 38.1 mm のステンレス電縫鋼管の断面プロフィールを示す。

5 結 言

新しいロール成形フラワーの設計に基づく CBR 成形法を開発し、高周波電縫溶接が難しいとされてきたステンレス鋼などの高グレード材においても、高品質の安定な電縫溶接が達成され、2 次加工性に優れたステンレス電縫鋼管の製造が可能となった。

- (1) 溶接部近傍での横断面で I 形のエッジ突き合わせと長手方向に広い角度の V 形状を実現し、ミルのロール圧下設定を高精度化することにより、溶接時の温度変動を低減し、溶接温度の適正範囲を拡大した。これにより、優れた溶接部品質を有するステンレス電縫鋼管の製造が可能となった。
- (2) ケージロール成形および張出し成形によりロール疵の発生を抑制し、無水・無潤滑下でのロール疵の防止を達成した。これにより、完全に無酸化雰囲気となり、不活性ガスシールド溶接後のステンレス電縫鋼管の溶接部品質は大幅に向上した。
- (3) エッジウエーブの発生を抑制し、肉厚 0.6 ~ 0.8 mm の極薄肉パイプの安定製造が可能となった。
- (4) 低ひずみ造管により材料の加工硬化を抑制し、未焼鈍パイプの 2 次加工特性を従来成形法の製品に比べて大幅に向上させた。

CBR 成形ミルにより、種々の優れた特性を有する排気ガスシステム用ステンレス電縫鋼管の安定製造を達成した。

参 考 文 献

- 1) 芳賀博世、田中徳雄、鶴田秀雄：鉄と鋼、71(1985)2, A53
- 2) F. Nicolai: Proc. ITA Conf. Tube Tech 87, (1987)
- 3) T. Nakata: Proc. ITA Conf. Tube Tech 87, (1989), 8917
- 4) T. Toyooka: Proc. the 10th World Tube Congress, (1994), 94
- 5) 芳賀博世、青木和雄：昭和 55 年度溶接学会春季全国大会講演、26(1980), 120
- 6) 近藤 永、佐藤 剛、芳賀博世、桜井謙輔、青木和雄：製鉄研究、

(1979)297, 84

- 7) 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、(1997)362, 17
- 8) 豊岡高明、橋本裕二、小林邦彦、板谷 進、井手 勉、西田保夫：川崎製鉄技報、22(1990)4, 236
- 9) 新司 修、板谷 進、豊岡高明：川崎製鉄技報、25(1993)2, 105
- 10) 豊岡高明、橋本裕二、郡司牧男：川崎製鉄技報、29(1997)2, 78