

ステンレス電縫鋼管の無水・無潤滑下における 高速造管技術の確立*

川崎製鉄技報
29 (1997) 2, 78-83

High Speed Production Technology of ERW Stainless Steel Pipes without Lubrication



豊岡 高明

Takaaki Toyooka

技術研究所 鋼管・鋳
物研究部門 主任研究
員(課長)



橋本 裕二

Yuji Hashimoto

技術研究所 鋼管・鋳
物研究部門



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(掛長)

要旨

自動車排ガス装置のステンレス化に対応するため、高品質のステンレス電縫鋼管の製造技術が求められている。ステンレス鋼は炭素鋼に比べて物理特性が異なることから、電縫鋼管製造時にロール疵および溶接部の酸化物生成によるペネトレータ欠陥が発生しやすい。従来は成形時に潤滑を行いロール疵の防止を図ってきたが、この潤滑剤が溶接部品質の不安定化をもたらす一つの要因となっていた。そこで、無水・無潤滑下においてもロール疵の発生しないロール成形を達成し、健全な溶接部を有する高品質ステンレス電縫鋼管を製造可能な CBR (chance-free bulge roll) 成形ミルとそれによる高速造管技術を開発した。

Synopsis:

In order to respond to the tendency of using stainless steel for automotive exhaust pipes, a technology of manufacturing high quality ERW stainless steel pipes has been needed. Roll marks and penetrator defects of welded seam due to formation of oxides easily occur during the manufacture of ERW stainless steel pipes because the physical properties of stainless steel are different from those of carbon steel. In the conventional forming process, lubrication is necessary to prevent roll marks. However lubricant is a cause of deterioration of welded seam quality. Kawasaki Steel developed a mill using a new forming process. It is the CBR (chance-free bulge roll) forming mill that can manufacture high quality ERW stainless steel exhaust pipes with excellent formability. It has achieved high quality of welded seam in welding with a speed as high as 110 m/min and the suppression of roll marks without lubrication.

1 緒 言

電縫鋼管は、鋼帯を連続的に供給して成形ロールで円筒状に成形した後、この円筒素管の両縁部を高周波溶接して製造される。これらの電縫鋼管の製造工程は同一のライン内で連続していることから、現在最も生産性が高く、かつ、信頼性の高いパイプ製造法の一つとされている。その用途も拡大してきており、次第に厳しい用途に使用されるようになってきた。

自動車産業では、昨今の地球環境問題から排ガスのクリーン化や燃費向上が推進され、排ガスシステム用材料の軽量化とステンレス化が急速に進められている^{1)~4)}。このような背景の中で、エキゾーストマニホールドやセンターパイプなどの部品にステンレス電縫鋼管が使用されるケースが増えてきた。特に、エキゾーストマニホールドは、狭いエンジンルーム内に設置されるため、曲げ、拡管などの厳しい加工が行われる。したがって、電縫溶接部の品質も含めたパイプの加工性が高温強度、耐酸化性と並んで重要な特性となる⁵⁾。

当社では、自動車排ガス用ステンレス電縫鋼管を製造するため、1990年に、知多製造所小径電縫鋼管工場に2インチ CBR (chance-free bulge roll) 成形ミルを導入した^{6)~10)}。CBR 成形ミルは、成形ロールの管サイズ兼用化による生産性の向上と溶接品質および2次加工品質の向上の両立を目的に開発したミルである¹¹⁾。

特に、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んでいるため、電縫溶接時にペネトレータと呼ばれる酸化物が溶接部に残存しやすく、炭素鋼に比べて溶接が難しい。CBR 成形ミルでは、ステンレス鋼の溶接部品質を向上させるため、不活性ガス雰囲気シールド溶接に加えて、雰囲気露点の上昇し溶接部品質に影響を及ぼす¹²⁾と考えられる成形ロールの潤滑剤を使用しないドライ造管を指向した。CBR 成形ミルの立ち上げ時に無潤滑下における高速連続(大量)造管テストを実施し、成形面の諸問題を解決して従来ミルでは困難とされてきた完全無水・無潤滑下におけるステンレス鋼管の高速造管技術を確立した。これにより、溶接部品質の優れたステンレス電縫鋼管の製造が可能となった。

本報では、CBR 成形ミルにおける成形ロールの無水・無潤滑下での高速造管技術について述べる。

* 平成9年5月23日原稿受付

2 CBR成形ミルの概要

CBR 成形法は、新しい張出し成形曲げ方式と、ケージロールを用いたロール兼用機構を含むハード技術による高精度成形ミルとを特徴とする。

2.1 成形フラワー

Fig. 1 に、CBR 成形法の成形フラワーを従来成形法と比較して示す。CBR 成形法は、エッジベンドロールにより帯板両エッジ部を予め成形した後、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型の素管を作る。次いで、フィンパスロールにて、管円周方向の4ヶ所をいったんオーバーベンドした後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し、従来の帯板全体を徐々に円弧に曲げていくサーキュラーベンド方式と異なる。

この特徴あるフィンパス張出し成形フラワーを採用することにより、溶接品質面では、Fig. 1 に示すようにエッジの突合せがI型の状態でフィンパス成形後のエッジの開口幅 W_F 、すなわち溶接直前のエッジの開口幅（V シェイプ角度）を大きくすることができ、安定した高周波溶接を行える特徴を備えている^{11,13)}。

2.2 成形設備

CBR 成形ミルのライン構成をFig. 2 に示す。成形スタンドの配列は、上流成形からエッジベンドロール (EB)、センターベンドロール4段 (1CB~4CB)、フィンパスロール2段 (1F, 2F)、ロータリーシームガイドロール (RSG)、スクイズロール (SQ) の構成であり、1CB 出側から1F 入側までの範囲はケージロール成形域 (CR) となっている。駆動ロールはEB, 1CB, 1Fおよび2Fの4段である。本成形法は、フィンパス成形前の上流成形ロールの管サイズ兼用化を図り、ロールの組み替えなしにそれらのロール設定位置の変更のみで多サ

イズの電縫鋼管の成形を可能とし、生産性向上に大きな効果を発揮している^{14,15)}。ステンレス電縫鋼管製造用CBR 成形ミルの製造可能範囲は、外径 22.2~60.5 mm、板厚 0.6~3.0 mmである。

3 無水・無潤滑造管における成形技術

3.1 ロール疵の抑制

Fig. 3 に、CBR 成形ミルのセンターベンドロール (CB) 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 (BD) のそれと比較して示す。CBR 成形ミルは、ケージロールでエッジ部を拘束するため、CB は帯板中央部のみ接触すればよい。したがってCB ロールはロール幅が狭くでき、スロート部とフランジ部とのロール周速差が少なくなりロール疵の発生が抑制される。一方、従来のBD ロールでは帯板のエッジ部まで抱えて拘束するため、ロール周速差が大きくロール疵が発生しやすい。

また、CBR 成形法では、フィンパス成形においても以下の理由によりロール疵が発生しにくい。従来成形法では管サイド部に最大曲げモーメントが作用すると同時に、管サイド部のロールによる幅寄せのために、この部分のロールとの接触圧が最大となる。一方、CBR 成形法では、最大曲げモーメントが管サイドから外れ、オーバーベンド部よりに作用することと、管サイド部の横幅がロール孔型横径よりも小さく、ロールバイト内にて管サイド部を張り出させる成形となり、ロールフランジ部における帯板との接触圧力が小さくなりロール疵の発生が抑制される¹⁶⁾。Fig. 4 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。CBR 成形法では、2ロール型フィンパスのロールフランジ部相当での材料とロールの接触圧力が小さいため、従来成形法においてこの部分で発生していたロール疵を抑制することが可能である。そして、実生産においては、張出し型ロール形状を有する分割ロール構造にすることにより、完全無潤滑下でのロール疵防止を達成した。

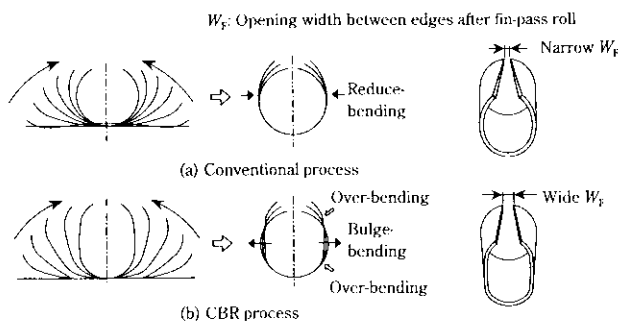


Fig. 1 Comparison of forming flowers between conventional forming process and CBR forming process

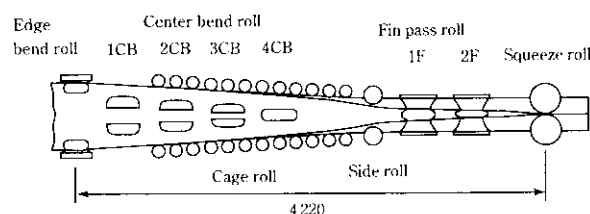


Fig. 2 Layout of 2" CBR forming mill for manufacturing ERW stainless steel pipes

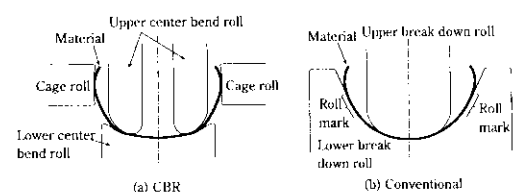


Fig. 3 Comparison of forming rolls between CBR and conventional forming

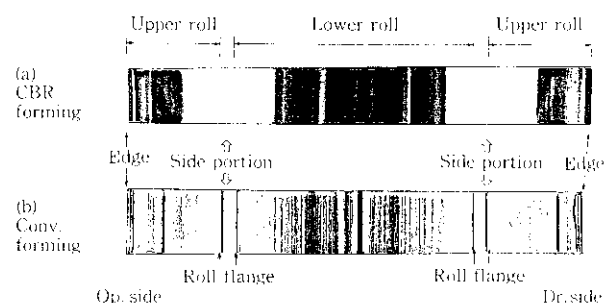


Fig. 4 Contacting state of formed sheet with No. 1 F roll

3.2 素管周長減少の抑制

造管速度 110 m/min の高速域において無潤滑連続造管テストを実施し、その成形特性を調べた結果、少量造管テストを行っていたモデルミル実験では把握できなかったフィンパス出側の素管外周長が減少するという現象（素管周長減少）が発見された。以下に、本現象の特徴、原因究明、対策について述べる。

3.2.1 素管周長減少の特徴

無潤滑下における連続(大量)造管テストにおいて、造管開始直後と約 15 t 造管後のそれぞれ CBR 成形ミルに噛込んだ状態の中止め材を採取し、成形過程の周長変化を測定し比較した。結果を Fig. 5 に示す。約 15 t 造管後に採取した中止め材は、造管直後のそれに比べてフィンパス出側の素管周長が小さいために、アブセット量の減少が生じている。この素管周長の減少は、すでにフィンパス入側の入流成形段階で認められ、最終ケージゾーン出側における周長は造管開始直後に比べて約 1 mm も小さくなっていった。これは、ケージゾーンにおける素管周長が減少することにより溶接アブセット減少が生じていることを示している。溶接アブセット量が不足すると内外面への溶鋼の排出量が減少し、ベネトレタ欠陥が発生しやすくなるため溶接部の品質確保が困難となる。

対策の一つとして、帯幅を広げ、大量造管時のアブセット量を確保することが考えられるが、この方法であると造管当初のパイプについて過剰なアブセットならびに大きな円周方向の絞りが付加されて材料の加工硬化が大きくなるという問題が予想され、別の対策が必要とされた。

3.2.2 原因の究明

(1) 実験方法

周長減少の発生メカニズムの仮説を Fig. 6 に示す。CBR 成形ミルのみならず電鍍鋼管ミルでは、帯のローリング防止のために駆動スタンドごとにロール周速比を徐々に上げ、スタンド間に張力を与えて造管している。CBR 成形ミルでは、第1センターバンドロール(1CB)に対する第1フィンパスロール(1F)のスロート径換算周速比を 1% 増速して造管している。このた

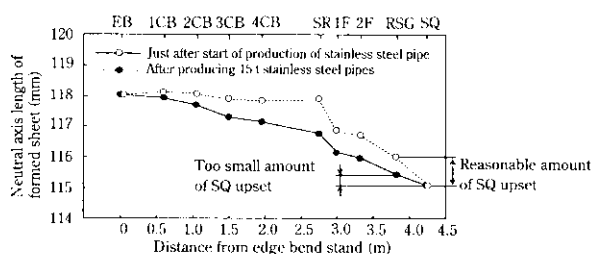


Fig. 5 Variation of neutral axis length of formed sheet in CBR mill zone (SUS436J1L, ϕ 38.1 mm $\times$ t 2.0 mm)

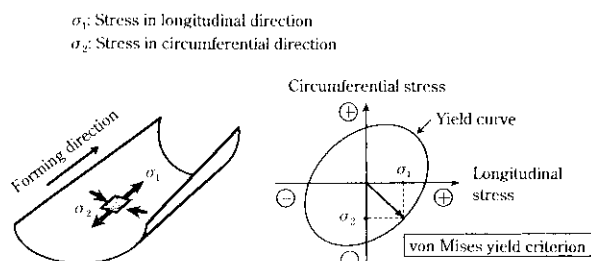


Fig. 6 Mechanism of decrease in strip width in cage roll zone

め、帯板に長手方向張力が作用するが、この力のみで材料を塑性変形するためにはさらに大きな張力が必要であると考えられる。成形中に長手方向に加えて幅方向の圧縮力が作用しているとすれば 2 軸応力状態となり、von Mises の降伏条件で示されるように、長手 1 軸状態での降伏応力以下の長手応力の作用で塑性変形し、周長が減少すると考えられる。そこで、長手方向および幅方向応力に着目して造管特性の調査を行った。

ミル内張力を直接測定するのは困難であるため、1CB のロールシャフトにひずみゲージを貼ってトルク変化を測定した。また、3CB 直下のケージロールヨークにひずみゲージを貼ってケージロールに作用する力の変化を測定した。次に、無水・無潤滑下での連続造管時に摩擦発熱によるロールの温度上昇が考えられる。そこで、各ロールの温度上昇を測定し、摩擦係数の温度依存性についても調査した。

(2) 実験結果および考察

Fig. 7 に 1CB 上ロールのトルク測定結果を示す。トルクは、モーターが発電機サイドになる方向の値を示し、造管量とともに数値が増加する傾向にある。したがって、造管量とともにミル内長手方向張力が増大していると考えられる。

Fig. 8 にケージロールに作用する力の変化を測定した結果を示す。面圧方向およびスラスト方向の力 (P_1 , P_2) は、長手方

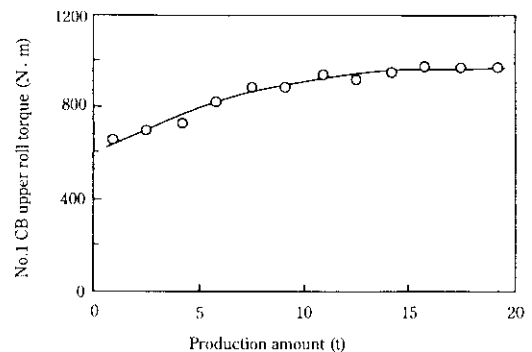


Fig. 7 Effect of pipe production amount on roll torque of No. 1 CB roll

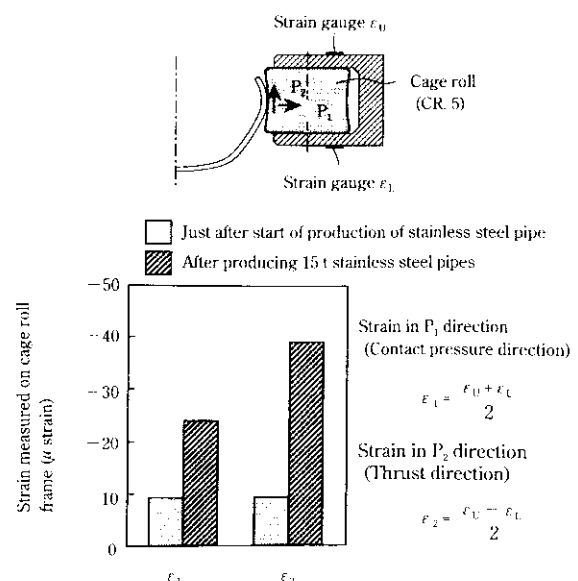


Fig. 8 Variation of forces acted in cage roll

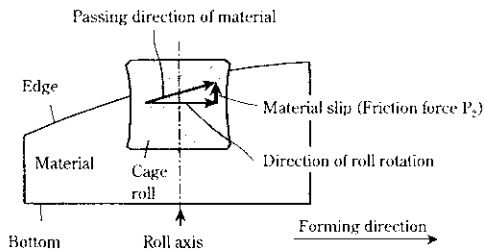


Fig. 9 Formation mechanism of friction force acting on cage roll

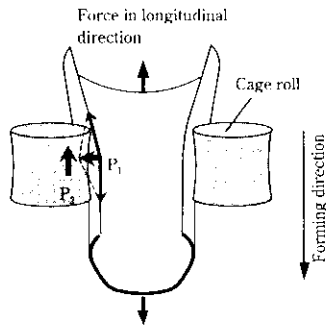


Fig. 10 Relation between longitudinal force and forces acting on cage roll

向張力 (1CB トルク) と同様に、造管量とともに増大している。なお、スラスト方向の力 P_2 は、ロールを上を持ち上げる方向に働いていることがわかった。 P_2 により、逆に材料側へは幅方向圧縮力が作用することになる。

そこで、ケージロールに作用する面圧方向およびスラスト方向の力について以下に考察した。Fig. 9 にケージロールによる幅方向圧縮力の発生メカニズムを示す。平板から円筒状に成形されるケージゾーンでは、エッジが立ち上がりながら成形される。これに対して、ケージロールの回転軸の方向はライン方向に対して直角の方向であるため、ロールの回転方向と材料の進行方向が異なり、材料が個々のロールを通過する際、ロール面を上方向に滑りながら成形され、ロールを上を持ち上げる方向のスラスト力 (摩擦力) P_2 が発生すると考えられる。長手方向張力とともに増大する理由として、Fig. 10 に示すように、帯板張力が増大すると面圧方向の力 P_1 が増加し、 μP_1 (μ は摩擦係数) の成分である P_2 も増加すると考えられる。

これらのことから、周長減少は長手方向張力の作用とケージロールによる幅方向圧縮力の作用により 2 軸応力状態となって発生すると考えられる。

連続大量造管時に周長減少が生じた理由として、連続造管するとフィンバスロール (1F) の温度が約 15 t 造管後で約 150℃ まで上昇していたことから、摩擦発熱によるロールの温度上昇が考えられる。帯板に作用する張力は、ロールと材料の摩擦力 μP と相関があると考えられる。Fig. 11 に示すように摩擦係数 μ に温度依存性があることから、 μP は摩擦熱によって上昇するロール温度と関係していると考えられる。すなわち、連続大量造管するとロール温度が上昇して μ が増加するため、長手方向張力が大きくなると考えられる。

3.2.3 防止対策

長手方向張力の作用とケージロールによる幅方向圧縮力の作用による 2 軸応力状態により周長減少が生じることが推定されたため、これらの作用を軽減させる対策を実施した。

ケージロールによる幅方向圧縮力の軽減対策を Fig. 12 に示す。

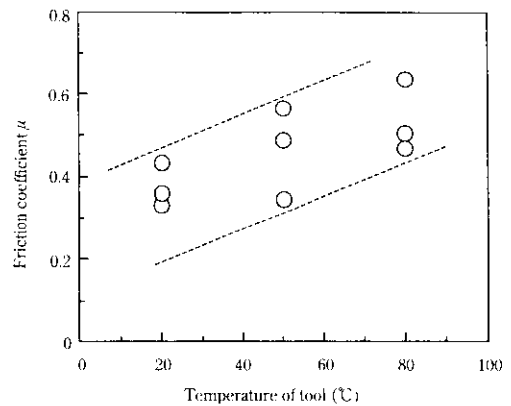


Fig. 11 Relation between temperature of tool and friction coefficient (Tool: sintered hard alloy, Material: SUS436J1)

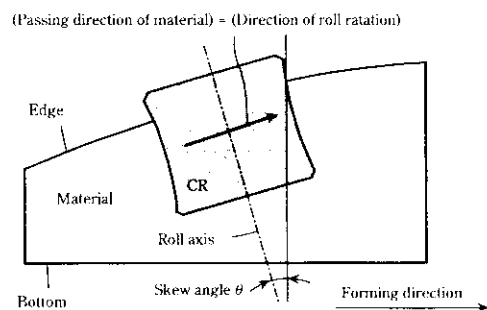


Fig. 12 Skew of cage roll axis

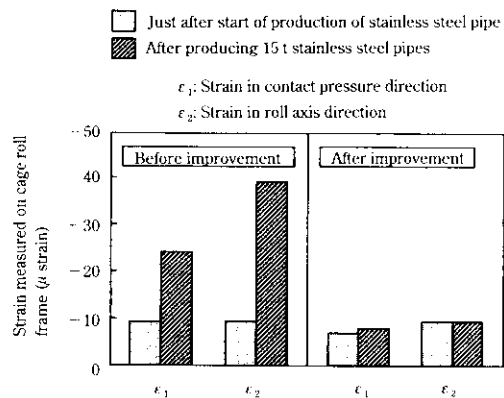


Fig. 13 Comparison of strain measured on cage roll between before and after improvement

材料の接触部におけるケージロールの回転方向と材料の進行方向のずれが少なくなるようにケージロールの回転軸を傾斜させることにより、スラスト方向の力 (ϵ_2 方向) は、Fig. 13 に示すように、連続造管を行ってもその増加が抑制され、対策前に比べて約 1/4 に低減した。

次に、1CB に対する 1F のロールスロート周速比の見直しを行うことにより、ケージロール成形域の長手方向張力を軽減させた。Fig. 14 に、ロールスロート周速比と造管開始直後の 1CB および 1F トルクとの関係を示す。1CB トルクは周速比が (1CB/1F) 約 98% 以下では駆動サイド、それ以上では発電機サイドとなることがわかった。周速比を 97% にすると 1CB による帯板の押し込みが強く働き、1CB~2CB 間で帯板が上下方向に振動して成形が不安定

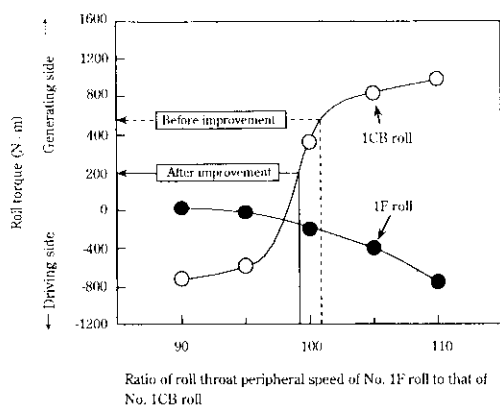


Fig. 14 Relation between ratio of roll throat peripheral speed of 1F roll to that of 1CB roll and roll torque

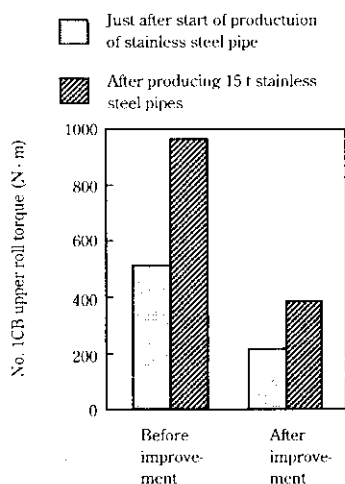


Fig. 15 Comparison of No. 1 CB upper roll torque between before and after improvement

になる。また、帯板の先後端では張力が緩む傾向にあり、周速比を小さく設定すると圧縮側になるため、帯板の長手方向にわたって引張側になるように、約200 N·mの発電機サイドのトルク(1CB)が発生する周速比99%に決定した。

周速比見直し前後の連続造管における1CBトルク測定結果をFig. 15に比較して示す。1CBトルクは、周速比を99%にしたことにより連続造管を行ってもその増加が抑制され、対策前に比べて約1/2に低減した。また、周速比を見直したことにより、Fig. 16に示すようにフィンパスロールの温度上昇が小さくなり、70℃以下に抑えることができた。なお、ロールスロット周速比を見直したことにより、ケージロールの面圧方向の力(e_1 方向)もFig. 13に示すように軽減させることができた。

これらの対策により、成形ロールの完全無水・無潤滑下において最大ミル速度110 m/minに増速しても、素管周長減少の発生がなくなり、成形の安定化を達成した。この完全無水・無潤滑下における高速造管技術確立後、工程生産を開始した。なお、この変動はソリブル油などによるロール潤滑を行えば抑制は可能と考えられたが、ステンレス鋼の溶接部品質の向上を狙い上述の対策で解決した。

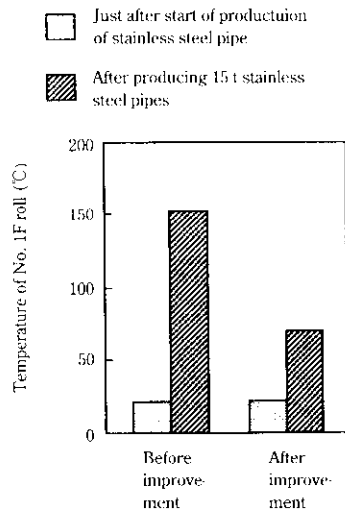


Fig. 16 Comparison of temperature of No. 1F roll between before and after improvement

4 排ガス用ステンレス電縫鋼管の品質特性

4.1 溶接部品質

溶接部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(Fig. 17)。なお、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。Fig. 17より、無潤滑材は潤滑を行ったサンプルに比べて溶接部の靱性が優れることがわかる。Photo 1に、シャルピー試験片の破面を

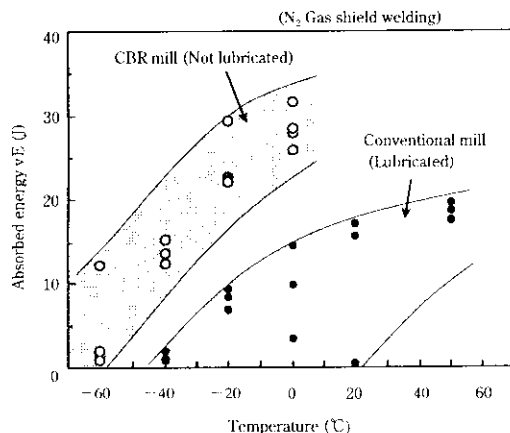


Fig. 17 Welded seam toughness of ERW stainless steel exhaust pipes produced by CBR and conventional mills (SUS436J1, $\phi 38.1 \text{ mm} \times t 2.0 \text{ mm}$)

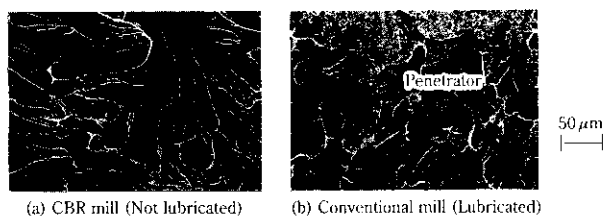


Photo 1 Fracture appearance of Charpy impact test specimens of ERW stainless steel exhaust pipes produced by CBR and conventional mills (SUS436J1, $\phi 38.1 \text{ mm} \times t 2.0 \text{ mm}$)

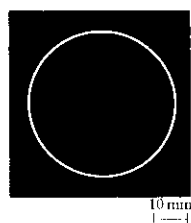


Photo 2 Cross section of ultra thin wall-thickness ERW stainless steel exhaust pipe produced by CBR mill (SUS436J1, $\phi 38.1 \text{ mm} \times t 0.6 \text{ mm}$)

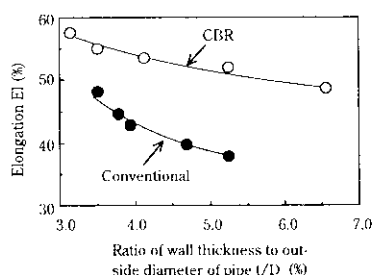


Fig. 18 Comparison of elongation of ERW stainless steel exhaust pipe by tensile test between CBR and conventional forming (SUH409L)

SEM 観察した結果を示す。潤滑を行ったサンプルの破面には、ペネトレータが多く認められた。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。無潤滑材ではペネトレータはなく、健全な溶接部が得られている。このように、完全無水・無潤滑下における高速安定成形技術を確立したことにより、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。

4.2 極薄肉パイプの製造

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連続的に拘束することにより、断面形状を滑らかに変化させて帯板への付加的歪を必要最小限に抑えたこと、また、フィンバス張出し成形時に縦径を圧縮するため素管の管底部が長手

方向に伸ばされやすいことにより、エッジウエーブの発生を抑制し薄肉材の安定成形が達成できる。従来ブレイクダウンミルでは、ステップ的に成形され急激に断面形状が変化するために、帯板エッジ部に縁伸びと呼ばれる過大な伸びが生じ、エッジウエーブが発生しやすいため、成形が困難であった板厚 0.6~0.8 mm の極薄肉パイプも CBR 成形ミルでは、Photo 2 に示すように製造可能であり、すでに工程生産も行っている。

4.3 製品パイプの伸び特性

Fig. 18 に実管引張試験 (JIS11号試験片) における製品パイプの伸び特性を示す。CBR 成形ミルでは成形過程中的材料の加工硬化が小さいため¹⁷⁾、従来ミルに比べて高い伸び特性を有するステンレス電縫鋼管の製造が可能である。

5 結 言

高加工性が要求される自動車排ガス用ステンレス電縫鋼管の溶接部品質の向上を図るため、成形ロールの完全無水・無潤滑下での高速安定造管技術を確立するとともに、製品パイプの品質特性を調べ、以下の結果を得た。

- (1) 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、完全無水・無潤滑下でのロール疵の防止を達成した。
- (2) 無潤滑連続造管テストにおいて発生した「素管周長減少」と呼ぶ成形面の課題を、スタンド間張力の最適化およびケージロール回転軸の傾斜対策により解決し、完全無潤滑下において成形・溶接の安定化を達成し、工程生産を開始した。
- (3) 完全無水・無潤滑下における高速安定成形技術を確立したことにより、完全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。
- (4) フィンバス張出しロール成形法によりエッジウエーブの発生を抑制し、板厚 0.6~0.8 mm の極薄肉パイプの安定製造が可能となった。
- (5) 成形過程中的材料の加工硬化を抑制し、高い伸び特性を有するステンレス電縫鋼管の製造を可能にした。

以上のような種々の優れた特性を有する CBR 成形ミルによる排ガス用ステンレス電縫鋼管製造技術を確立した。

参 考 文 献

- 1) 朝倉健太郎：金属，62(1992)11, 2
- 2) 石川秀雄：材料とプロセス，4(1991)6, 1760
- 3) 植松美博，宮崎克久：ステンレス，35(1991)3, 10
- 4) 大村圭一：金属，62(1992)11, 9
- 5) 成本朝雄：金属，62(1992)11, 15
- 6) 豊岡高明，橋本裕二，志賀 厚，佐山泰弘：材料とプロセス，3(1990)5, 1468
- 7) 豊岡高明，橋本裕二，成本朝雄，小林邦彦，佐山泰弘：材料とプロセス，4(1991)2, 582
- 8) 豊岡高明，橋本裕二，成本朝雄，小林邦彦，佐山泰弘，西田保夫：材料とプロセス，4(1991)2, 583
- 9) 豊岡高明，橋本裕二，小林邦彦，板谷 進，井手 勉，西田保夫：材料とプロセス，4(1991)5, 1466
- 10) 新司 修，西田保夫，板谷 進，唐沢順市，郡司牧男，橋本裕二，豊岡高明，成本朝雄：材料とプロセス，5(1992)2, 533
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 芳賀博世，田中徳雄，鶴田秀雄：鉄と鋼，71(1985)2, A53
- 14) 板谷 進，西田保夫，新司 修，豊岡高明，橋本裕二：材料とプロセス，5(1992)2, 532
- 15) 板谷 進，井手 勉，西田保夫，新司 修，豊岡高明，橋本裕二：材料とプロセス，5(1992)2, 531
- 16) 新司 修，板谷 進，豊岡高明：川崎製鉄技報，25(1993)2, 105
- 17) 豊岡高明，橋本裕二，成本朝雄，宮崎 淳，小林邦彦，唐沢順市，西田保夫，川崎龍夫：材料とプロセス，4(1991)6, 1800