

鋼管における寸法制御と精度向上

西川 幸一良*

Improvement of Size and Gage Control in Steel Pipe

Koichiro NISHIKAWA

Key words: mannesman plug mill process ; mannesman mandrel mill process ; extrusion process ; cold drawing process.

1. マンネスマン・プロセス

1・1 製造プロセス

プラグミルライン、マンドレルミルラインの概要を図1に示す。プラグミルラインでは、素材の丸ビレットを回転炉床式加熱炉で加熱しピアサで穿孔する。その後、傾斜圧延方式のエロンゲータと孔型圧延方式のプラグミルで減肉加工を行う。続いて傾斜圧延方式のリーラで軽圧下を加えて内外面の平滑度を向上させた後、サイズで定径を行い製管を完了する。

マンドレルミルラインでは、ピアサで素材を穿孔した後、7～8スタンドの連続孔型圧延ミルであるマンドレルミルで減肉加工を行う。再加熱の後、ストレッチレデューサで圧延材に張力を作用させながら外径絞り圧延を行い製管を完了する。プラグミル、マンドレルミルの両ライン共、素材に角ビレットを使用しプレスロールピアサにて穿孔圧延を行う製管ラインもある。

1・2 寸法精度向上のための注意点

(1) プラグミルライン

プラグミルライン各工程の寸法精度への影響を表1に示す。

ピアサ、エロンゲータは傾斜圧延方式のミルのため、管にスパイラル状の偏肉が発生しやすい。従って良好な肉厚精度の圧延材を得るためには、丸ビレットの均熱度の確保、ロール、プラグ形状の最適化等が重要である。プラグミル

では肉厚、長さがほぼ決定されるので寸法精度向上には孔型とロールギャップ設定の最適化が必要である。またプラグミルでは同一孔型で2パスの圧延を行うので対向性の偏肉発生防止のためにもロールギャップ設定は重要である。リーラでは傾斜圧延方式で肉厚を軽圧下するので圧延材の肉厚、長さが変化するが、その変化量は小さい。サイズでは外径、真円度が決定されるが、管先端側に管端曲がり(鼻曲がり)が発生しやすい。寸法精度を確保するためには孔型設計、ロールギャップ設定が重要である。

(2) マンドレルミルライン

マンドレルミルライン各工程の寸法精度への影響を表2に示す。

ピアサではプラグミルラインと同様にスパイラル状偏肉の防止対策が重要である。マンドレルミルは孔型圧延であるので対向性の偏肉発生防止のためにはロールギャップ設定が重要である。さらに7～8スタンドの連続圧延機故の噛み込み、尻抜け時の過渡現象により長手方向の肉厚分布の変動が大きく、この対策としてロール回転数設定の最適化と共に過渡現象を緩和する制御が必要である。仕上げ圧延機であるストレッチレデューサは圧延材の肉厚、外径、長さを決定するので寸法精度向上には最も重要な圧延機である。また、管内面の角張り現象発生防止には孔型形状、圧延スケジュールの最適化が必要である。一方、スタンド間張力不足に起因する圧延材両端部の増肉現象の発生防止にはロール回転数の制御が必要である。

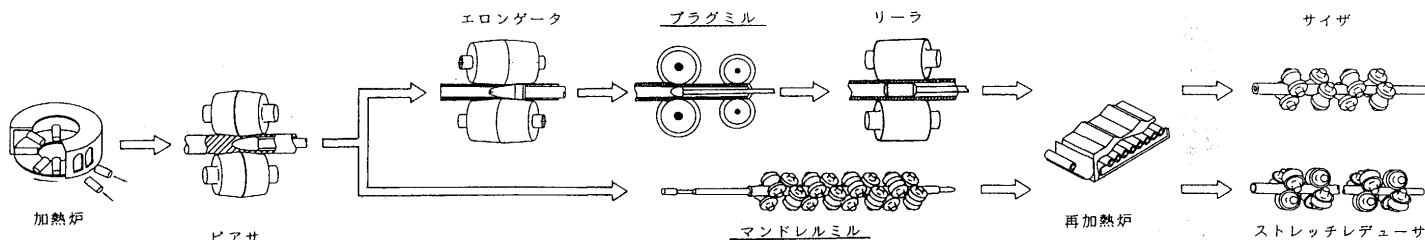


図1 プラグミルライン、マンドレルミルラインの概要図

平成4年8月3日受付 平成4年12月8日受理 (Received on Aug. 3, 1992; Accepted on Dec. 8, 1992) (依頼展望)

* (社)日本鉄鋼協会共同研究会鋼管部会長 (Chairman, Steel Pipes and Tubes Committee, The Joint Research Society, The Iron and Steel Institute of Japan, 1-9-4 Ohtemachi Chiyoda-ku, Tokyo 100)

表1 プラグミルライン各工程の寸法精度への影響 (◎：影響大, ○：影響小)

工 程	①穿孔工程	②延伸工程		③磨管工程	④定径工程
	ピアサ	エロンゲータ	プラグミル	リーラ	サイザ
肉 厚	——	——	◎	○	——
外径・内径	——	——	——	——	◎
真円度	——	——	——	——	◎
長 さ	——	——	◎	○	○
偏 肉	◎ (スパイラル状)	◎ (スパイラル状)	○ (対向性)	——	——
曲がり (真直度)	——	——	——	——	◎
管端部形状	——	——	——	——	——

表2 マンドレルミルライン各工程の寸法精度への影響 (◎：影響大, ○：影響小)

工 程	①穿孔工程	②延伸工程	③外径絞り・定径工程
	ピアサ	マンドレルミル	ストレッチレデュース
肉 厚	——	○	◎
外径・内径	——	——	○
真円度	——	——	○
長 さ	——	○	◎
偏 肉	◎ (スパイラル状)	○ (対向性)	◎ (内面角張り)
曲がり (真直度)	——	——	——
管端部形状	——	——	◎ (管端部増肉)

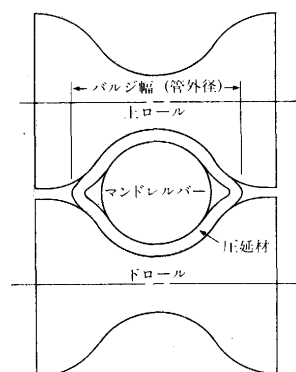


図2 マンドレルミル圧延の断面の模式図

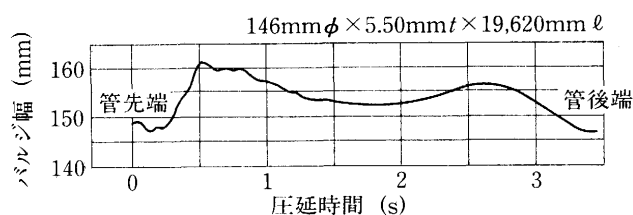


図3 マンドレルミル圧延中の外径変動（NO.4スタンダード出側）

1・3 改善・開発技術

1・3・1 圧延制御技術

(1) プラグミルライン制御

プラグミルラインでは、1970年代後半に相次いでピアサからリーラまでの圧延機制御が実用化された。ピアサ、エロンゲータではミルセットアップが、プラグミルでは伸ばし長さ制御が、リーラでは外径を一定にするAGC制御が行われている¹⁾。これらの制御の適用により長さ（平均肉厚）のバラツキ抑制、長手方向肉厚の均一化が図られている。また、オンラインの肉厚計²⁾を導入した制御システムがあり、これを操業管理に使用して寸法精度向上を図っている例もある。この時期には一連の圧延機制御の導入が行われたが、それ以降はレベルアップの例があるだけで寸法精度の大幅な向上はない。

最近5年間ではサイザでの外径制御³⁾が導入された。この制御はサイザ前での圧延材温度から定径後の冷間状態での外径を予測して、サイザ圧延中のロール圧下位置を制御するものである。しかし、サイジング前に再加熱炉が設置されているラインでは必要性は小さい。

1980年代以降、新設された中径シームレスミルラインは全てマンドレルミルを採用しており、今後プラグミルラインが建設される可能性は少ないので制御精度もほぼ現状維持と考えられる。

(2) マンドレルミルライン制御

マンドレルミルラインでは1970年代前半にストレッチレデュースに伸ばし長さ制御と管端肉厚制御⁴⁾が導入された。1980年代前半にはマンドレルミルに伸ばし長さ制御とスタマック制御⁵⁾が導入され、ほぼ現在の圧延機制御技術が確立されている。更に同時代に建設された新ミルではマンドレルミルがフルフロート方式からリテインド方式に進歩しており、この方式に対応した肉厚一定制御⁶⁾も開発されている。これらの圧延機制御システムの開発によりマンドレルミルラインでのミル制御は一応あるべき姿となり、寸法精度、歩留は一定のレベルに達した。

さらに最近では以下に述べるように計測技術の進歩に伴い制御の高精度化が図られている。マンドレルミルでのスタマック制御では、スタンド間において直接管外径を測定し制御モニタとして用いることが行われるようになった(図2, 3)⁷⁾。また、鍛接管ミルには従来から用いられていた小径サイズ用のγ線肉厚計⁸⁾が、ストレッチレデュース出側に設置されて制御モニタとして使用される例がある(図4,

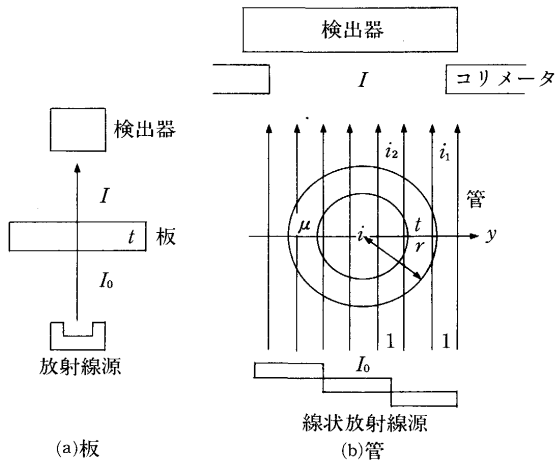


図4 r線肉厚計の測定方法

サイズ：101.6φ×3.45t (mm)
。オフライン肉厚実測値，—オンライン肉厚測定値
 $\bar{x}=0.01\text{mm}$, $\sigma=0.03\text{mm}$

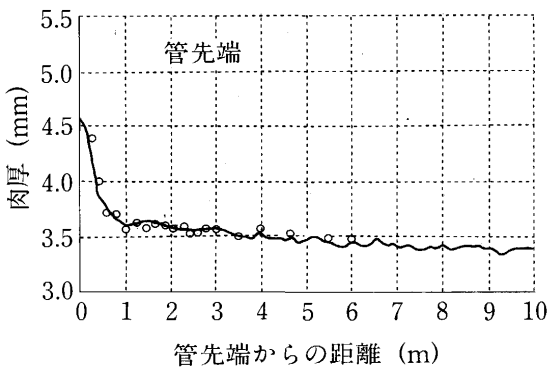


図5 r線肉厚計のオンライン測定の場合

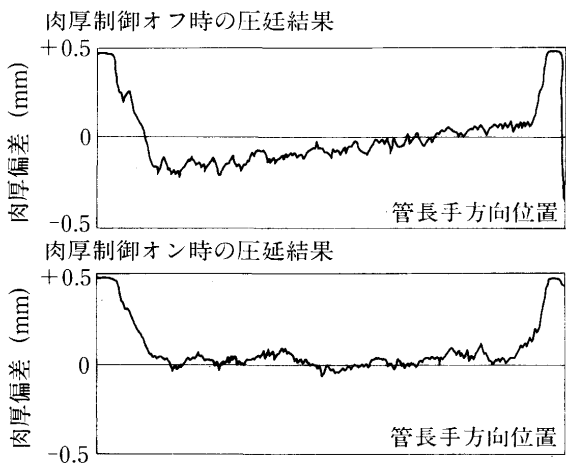


図6 オンライン肉厚計を用いたレデュース肉厚制御の場合

5)。さらに最近ではストレッチレデュースの前後にγ線の肉厚計を設置し測定結果を制御モデルに反映して管中央部の長手方向の肉厚均一化を図った制御システム⁹⁾の報告もされている(図6)。

さて、ストレッチレデュースでの管端増肉防止対策として特筆すべき技術が開発された。この技術は従来とは発想

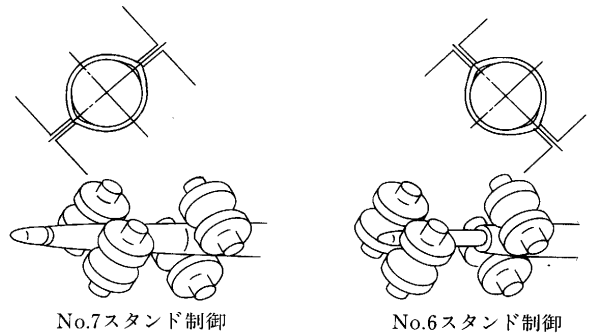


図7 マンドレルミルでの管端部予成形の模式図

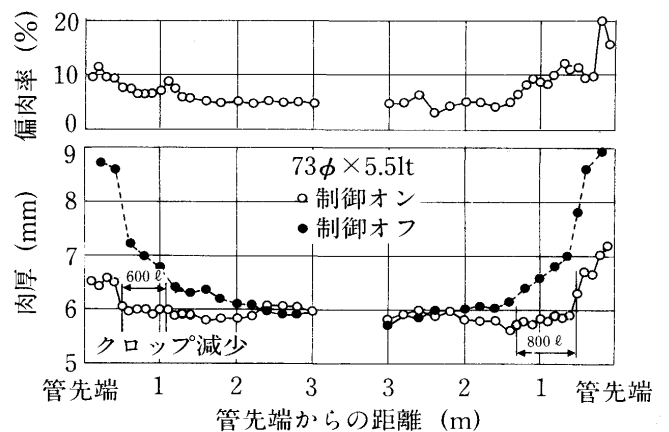


図8 レデュース圧延後の管端部肉厚分布の改善効果

を変えて前工程のマンドレルミルで両管端部を予めテーパ状に減肉成形しレデュースでの管端増肉を相殺するものである¹⁰⁾。マンドレルミルでの高速圧延に対応して両管端部を予成形するために高速で圧下調整を行う必要があり、鋼管の圧延機としては初めて油圧圧下機構を導入している。この結果、レデュース圧延後の管端部の寸法精度は大幅に改善され、管端増肉で生じる切り捨て部分を減少させる効果が得られている(図7, 8)。さらにこの油圧圧下装置を用いたマンドレルミルAGC制御の報告¹¹⁾がなされている。

1.3.2 圧延設備および圧延技術

圧延設備による寸法精度向上については、1980年代前半に建設された新ミルに導入されたリテインドマンドレルミルの改善効果が大きい。リテインド方式では、バー速度が一定なので噛み込み、戻抜け時のバー速度変化に起因する過渡現象が発生せず長手方向の外径、肉厚変動が大幅に減少した。この他にはピアサ、エロンゲータでの偏肉減少を目的とした圧延材、バー保持方法の設備改善が実施された程度で目立った動きはない。

一方、圧延技術については、マンドレルミル、ストレッチレデュースの変形解析に剛塑性有限要素法¹²⁾¹³⁾が用いられ孔型設計、回転数設定に反映されるようになってきたことが主な進歩といえる。現在では計算時間、解析手法の制約により数値解析の精度が不十分なために実験結果と合わせて実操業に反映されている。しかし、従来の手法では解析

表3 5年後の寸法精度の向上

項 目	プラグミルライン		マンドレルミルライン	
	'91年（現状）	'96年（目標）	'91年（現状）	'96年（目標）
対象サイズ	$\phi 267.4 \times t12.7$		$\phi 60.5 \times t3.9$	
肉 厚	20%	15~20%	20~25.6%	18~20%
外 径	0.7~0.8%	0.55~0.7%	1.0~1.16%	0.6~1.0%
内 径	1.24~1.8%	1.0~1.6%	3.0~3.8%	2.5~3.0%
長 さ	5~10mm	5~10mm	5~15mm	5~10mm
偏 肉	—	12~12.5%	—	10~12%
曲がり（偏芯量）	0.8~1.0mm/m	0.8~1.0mm/m	0.8~1.0mm/m	0.8~1.0mm/m
主な改善内容	①伸ばし長さ制御のレベルアップ ②計測器精度向上 ③ピレット、ブルーム均熱性向上と偏熱制御 ④切削プラグの使用		①熱間肉厚計によるフィードバック制御 ②熱間秤量機によるフィードフォワード制御 ③計測器精度向上 ④ピレット、ブルーム均熱性向上と偏熱制御	

できなかったマンドレルミル圧延でのフランジ側の変形が計算できるなどの知見が得られており圧延、操業技術への波及効果は大きい。

1・4 今後の課題

現在稼働中のプラグミルライン、マンドレルミルラインは、ほぼ全ての圧延機に制御が適用されている。このような状況の中で、さらに寸法精度の向上を図るためには計測器の精度向上が必要である。特にオンラインでの肉厚計については、圧延機制御に使用可能なレベルまで測定精度が向上すれば制御モデルへの反映が可能となり寸法精度の大幅な向上が期待できる。

さらに肉厚を決定する要因の1つである工具寸法の測定技術も重要である。特にマンドレルミルの場合は、バー外径分布を制御に使用可能な精度で測定することは困難な問題があり実用化された例はない。肉厚測定の精度向上と共に工具寸法計測も今後の技術開発に期待したい課題である。

また、圧延技術については各工程での変形解析の精度向上が今後の課題としてあげられる。現在、3次元剛塑性有限要素法による数値解析の精度向上、適用可能プロセスの拡大が試みられており、着実に成果をあげつつある。この数値解析技術の適用により圧延スケジュールの最適化、工具設計の最適化およびミル設定の高精度化が可能となり寸法精度の向上が期待できる。

寸法精度向上の具体的な例として、表3に製管4社の寸法精度の目標値、および代表的な改善内容に対する調査結果を示す。

2. 熱間押出プロセス

2・1 製造プロセス

熱間押出の概略製造工程は銅片加工（鋸断、旋削、面取、穿孔）→加熱→エキスパンション→再加熱→熱間押出→精整である。約1200℃に再加熱したピレットを図9に示すよ

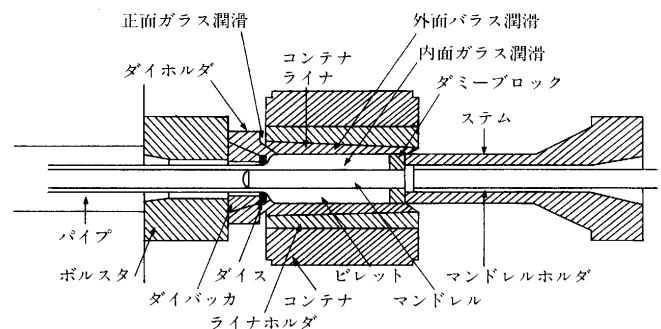


図9 押出機構および工具組立図

うな熱間押出装置でダイスとマンドレルの隙間に後方からステムを使って押出すことにより所定寸法の管を製造する¹⁴⁾。従って外径はダイス径で、内径はマンドレル径で、肉厚はダイス径とマンドレル径の差で原理的に決まる。

2・2 寸法精度向上のための注意点

熱押管の外径のバラツキにはピレット間（管毎）の変化とピレット内（管の長手方向）の変化がある。前者の変化要因としては1)繰返し使用されるダイスの摩耗による径変化2)潤滑ガラスの膜厚のバラツキ3)ピレット加熱温度のバラツキに伴う熱押後の冷却時の縮径差などが挙げられる。ただし、この変化は次に述べるピレット内変化に比べると小さい。ピレット内の変化を図10に示すが¹⁵⁾、後端になるほど外径は大きくなる傾向がある。この寸法変化の原因は、押出中のピレットの温度低下および押出直後のマンドレルによる抜熱と考えられる。これらの寸法阻害要因に対して工夫改善が行われ、外径の寸法精度は現在約±1.0%である。

次に、熱押管の肉厚はダイス径とマンドレル径で原理的に決まるが、以下に述べるような種々の要因のためにダイスの中心に対してマンドレルが偏芯することによって円周内および長手方向の肉厚の変動、すなわち、偏肉が生ずる。偏肉に影響を及ぼす主要因を以下にあげる。

1) 工具のアライメント：ダイス、マンドレル、コンテナの芯調整およびダイス、ステム先端の直角度など

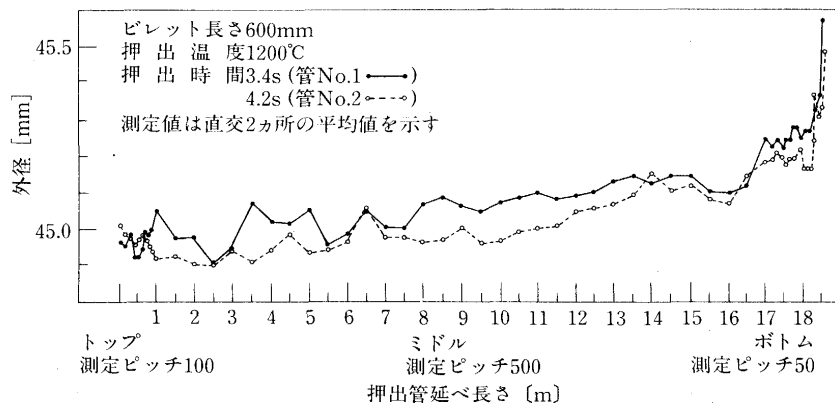


図10 押出管の外径変化 (SUS304, 45×5.0 [mm])

- 2) ビレット端面の直角度
- 3) ビレットの偏芯
- 4) ビレットの偏熱：加熱，再加熱時の偏熱およびコンテナなどの工具との接触による偏熱
- 5) 潤滑：不均一な潤滑によるメタルフローの乱れ
- 6) 工具のクリアランス：コンテナ内径とビレット外径，ビレット内径とマンドレル外径のクリアランス
- 7) 工具の摩耗：ダイホルダ，コンテナライナの摩耗によるメタルフローの乱れ

これらの要因に対してインダクションヒータのタップ位置調整，コイルとビレットの位置調整などの最適化によるビレットの偏熱改善あるいは工具やビレットの寸法精度向上などの工夫改善が行われ，偏肉率は現在約20%である。肉厚バラツキのほとんどはこの偏肉であり，肉厚精度は現在約±12.5%である。

2・3 改善・開発技術

熱間押出はコンテナ内部の奥まった場所での加工であり，また，片持ちのマンドレルを使った加工方法のため寸法制御は原理的に難しい。寸法制御に関する革新的な改善技術の報告は見られないが，日常作業において前述の寸法阻害要因に対して工夫改善が試みられ，寸法精度のより一層の向上が図られている。

2・4 今後の課題

熱押管は更なる外径精度の改善および肉厚精度とりわけ偏肉の改善が必要である。工具アライメントの動的測定および調節，均一加熱制御，押出ラム速度制御，押出工具材質の高強度化などの技術開発により，外径精度は±1.0%から±0.5%へ，偏肉率は20%から15%へ，肉厚精度は±12.5%から±10%への改善が図られると思われる。

3. 冷間加工プロセス

3・1 製造プロセス

冷間加工管は熱間押出法およびマンネスマン法で製造された継目無管または電縫管を素管とし製造される。冷間加工法には大別して冷間引拔法と冷間圧延法がある。概略の

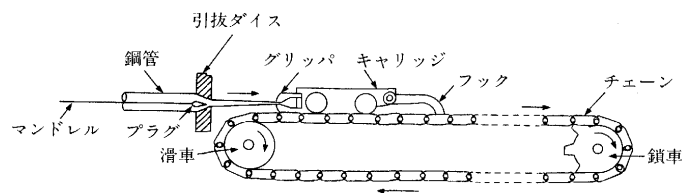


図11 冷間引拔加工概念図

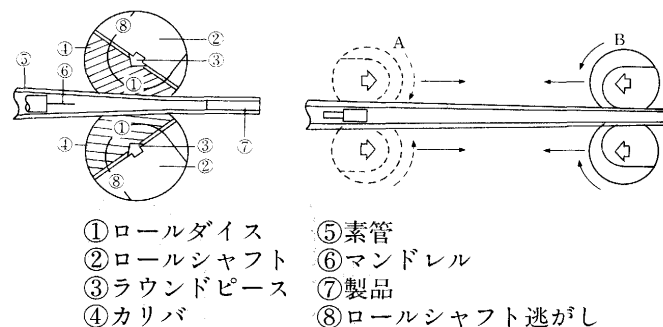


図12 ピルガ圧延図

製造工程は上記の素管を潤滑処理して所定の寸法に冷間引拔，または，冷間圧延した後，熱処理および矯正する。

冷間引拔法の模式図を図11に示すが¹⁰⁾，ダイスとプラグの間を引き抜く方法であり，外径はダイスで，内径はプラグで決まる。

次に冷間圧延法の模式図を図12に示すが¹⁷⁾，円周に沿ってしだいに細くなった孔型をもった一組のロールで，管をマンドレルの上を繰り返し圧延する方法である。圧延中は材料とマンドレルは静止しており，ロールを組み込んだハウジングが往復運動を行って材料を圧延する。一往復の圧延が終わった時に材料は一定量送り込まれるとともに，約60度または90度ずつ回転して，順次所定の寸法に加工する。外径はロールの孔径で，内径はマンドレルで決まる。

3・2 寸法精度向上のための注意点

冷間引拔法では外径および内径の寸法精度は現在約±0.75%である。しかし，工具の変形がない超合金のプラグおよびダイスを用いるなど特別な管理をすれば，寸法にもよるが±0.2%程度まで可能である。また，肉厚精度は冷間加工であることより，平均肉厚としては良好であるが，

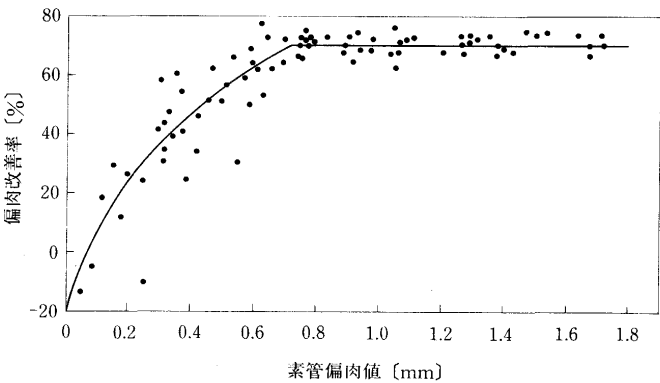


図13 偏肉改善例 (対象鋼種SUS321, SUS329J1, SH 446Ti)

冷間引抜法では素管偏肉の矯正効果を期待できず現在約±10%である。

次に、冷間圧延法では外径および内径の寸法精度は現在約±0.75%である。また、冷間圧延法では図13に示すように素管偏肉の矯正効果があるので¹⁸⁾、肉厚精度は±7.5%程度まで向上する。

曲がりは1 mm/mが一般的であるが、0.5mm/m程度まで可能である。切断精度は約10～30mmが一般的であるが、3 mm程度まで可能である。

3・3 改善・開発技術

冷間加工法は元来、寸法精度の良好な加工方法である。しかしながら、冷間加工による肉厚精度の向上は難しく、むしろ素管の偏肉精度に負うところが多い。

寸法制御に関する改善開発技術の報告はないが、原子力発電に使用される管の製造を通して寸法計測技術には進歩が見られる。沸騰水型原子炉（BWR）の燃料被覆管には、従来、ジルカロイ管が使用されてきた。しかし、原子力発電による電力供給比率が高まるにつれて、負荷追従運転を要求されるようになり、図14に示すように¹⁹⁾、ジルカロイ管の内面に純ジルコニウムを内張りした、より高性能のライナ被覆管が開発された。この管は炉芯で使用される材料であるため、当然、厳しい品質管理が要求される。均一なライナ厚さを非破壊的に保証するため、ライナ厚さが約1.6mmと比較的厚い素管に対しては超音波法を改良することにより約0.02mmの精度で²⁰⁾、ライナ厚さが55～125μmと比較的薄い製品に対しては渦電流法を応用することにより約2 μmの極めて高精度で¹⁹⁾、管の全面全長について厚さを測定する技術および装置が開発された。

3・4 今後の課題

冷間加工管としては、熱間押出およびマンネスマンで製造された素管の偏肉改善が望まれる。

4. 電縫鋼管プロセス

4・1 製造プロセス

電縫鋼管の製造工程を図15に示す。製造方法は熱延もし

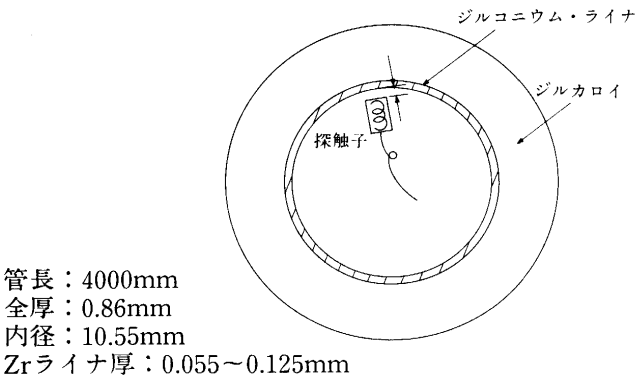


図14 ジルコニウム・ライナ被覆管の概要

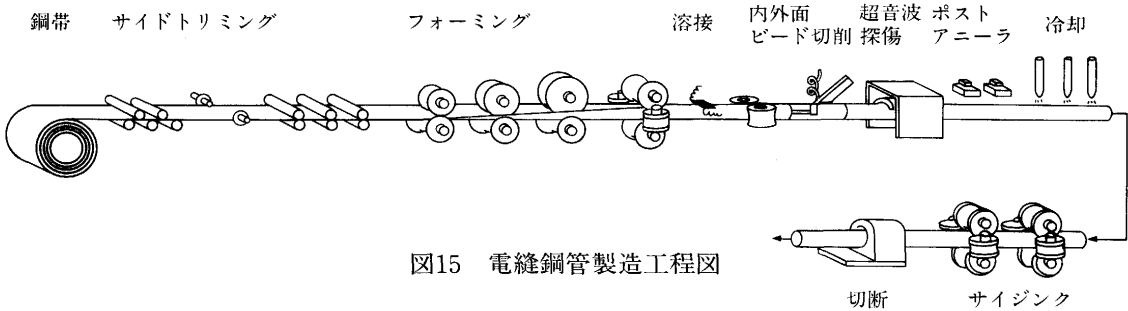


図15 電縫鋼管製造工程図

表 4 電縫鋼管製造工程における寸法精度への影響 (◎：影響大, ○：影響小)

項 目	工 程	成 形 (フォーミング)	溶 接	内外面ビード切削	冷却及びサイザー	走行切断	矯 正
肉 厚		◎	○	◎	○	—	—
偏 肉		◎	○	◎	—	—	—
外径・内径		◎	—	○	◎	—	○
真円度		○	—	—	◎	—	○
曲がり		○	—	—	◎	—	◎
長 さ		—	—	—	—	◎	○

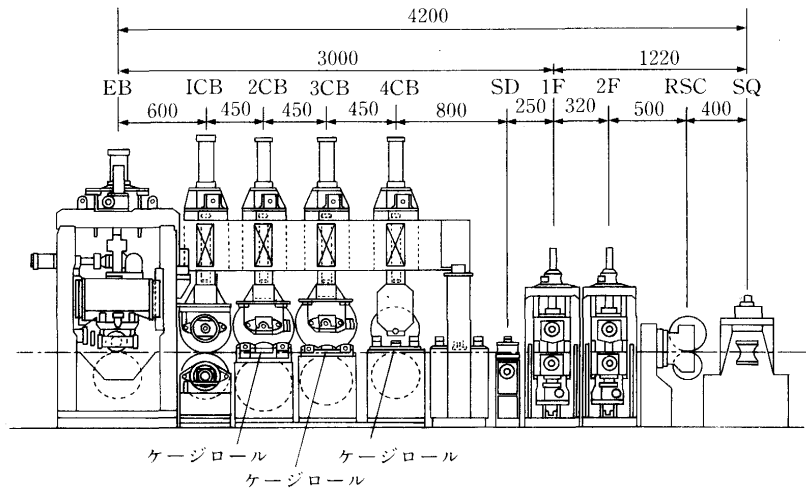


図16 CBRミル 製造範囲；OD：21.3～60.5φ t：0.8～2.5mm

くは冷延鋼帯を所定の帯幅にトリミング後、数段からなるロール群により円形状に連続成形後、鋼帯エッジ部に高周波電流を流して溶接を行う。溶接時に内外面に生じたビードはバイトで切削されるが用途に応じ、溶接時に生じた急冷組織を改善するためにポストアニーラにて熱処理が施される。次に、サイザーと称する数段からなるロール群により絞りをかけ定径を行う。最後に、走行切断機により所定の長さに切断後、曲り矯正、水圧試験、端面削り等の精整工程を通過することにより製品化される。

4・2 寸法精度向上のための注意点

電縫鋼管は素材として形状及び肉厚精度の良い鋼帯を用い冷間で製造されるため、肉厚、偏肉等の寸法精度は熱間で製造されるシームレス鋼管などに比べ優れている。しかし、肉厚と外径比 (t/D) が極端に大きく、または小さくなると成形時の肉厚や形状変動が増大する傾向にあり寸法精度を悪化させる。また、内外面ビード切削の良否も寸法精度を大きく左右する。

表4に各工程における寸法精度への影響度合を示す。

4・3 改善開発技術

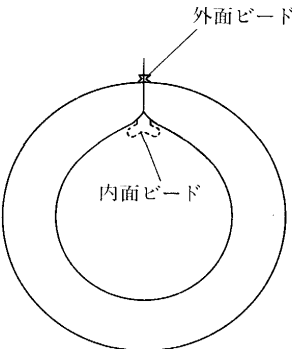


図17 ルーフィング現象

4・3・1 成形技術

ロール成形において肉厚と外径比 (t/D) が1.2%以下の薄肉材になるとエッジバックリングによるエッジ部近傍の波打現象が生じ寸法精度に悪影響を与える。その対策として採用されたのがケージフォーミング方式であり当初、26"ミルのような大中径サイズに用いられていたが、最近では小径サイズの薄肉材成形にも使用されるようになり効果をあげている²¹⁾(図16参照)。

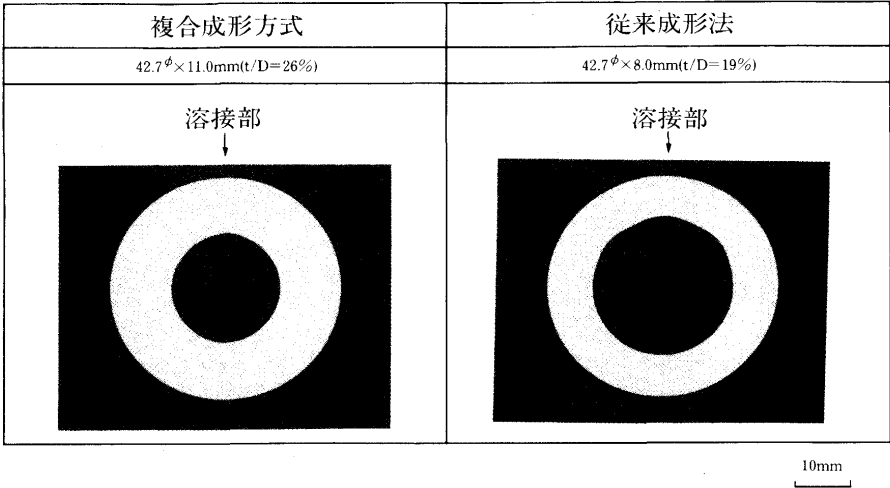


写真1 製品断面形状に関する従来及び複合成形方式での比較

次に、 t/D が20%を越えてくるとエッジ部の曲げ成形が不十分となり、図17に示すようにいわゆるルーフィング現象が発生して寸法精度を低下させる。その対策として考案された方式の1つに複合成形方式があげられ、 $t/D=26\%$ まで寸法精度が均一な良い製品ができるようになった。写真1に厚肉管を成形した時の従来方式との製品断面形状比較例を示す²²⁾。

4.3.2 成形セットアップ技術

サイズ変更時のロールのセットアップはオペレータの技量に依存するところが大きく、ロールチャンス毎に寸法精度に差がでる原因の1つにあげられていた。その対応としてコンピュータ制御のAPC機能(Automatic Position Control)により設定制御のできるミルの出現がみられてきた²³⁾。

4.3.3 内面ビード切削技術

内面ビード切削形状が悪いと、局部的ではあるが肉厚精度を低下させる。内面ビード切削作業は溶接直後に実施さ

れるため、切削状況の監視が困難であり、その良否はオペレータの技能に全面的に依存していたが、最近中径電縫鋼管を対象として監視技術が確立し²⁴⁾、バイト高さ調整の遠隔操作技術との併用により均一な切削形状が得られる目途が立ってきた。

4.3.4 曲り矯正技術

一般に、電縫鋼管の曲り矯正は、走行切断後曲り矯正機にて実施されている。調整はオペレータの経験によるところが大きく曲り量の測定も水系にて測定するか、あるいはオペレータの目測にて推定するレベルであった。しかし、最近小径管を中心にミルライン中にAPC機能を有する矯正機が導入されるようになってきて矯正技術は大幅に改善してきている。また、ミルラインにレーザを用いた自動計測器を設置したことにより、曲り量を瞬時に測定してアクションのとれる中径管ミルも出現してきている。

今まで述べた種々の対策の効果の一例として図18に寸法

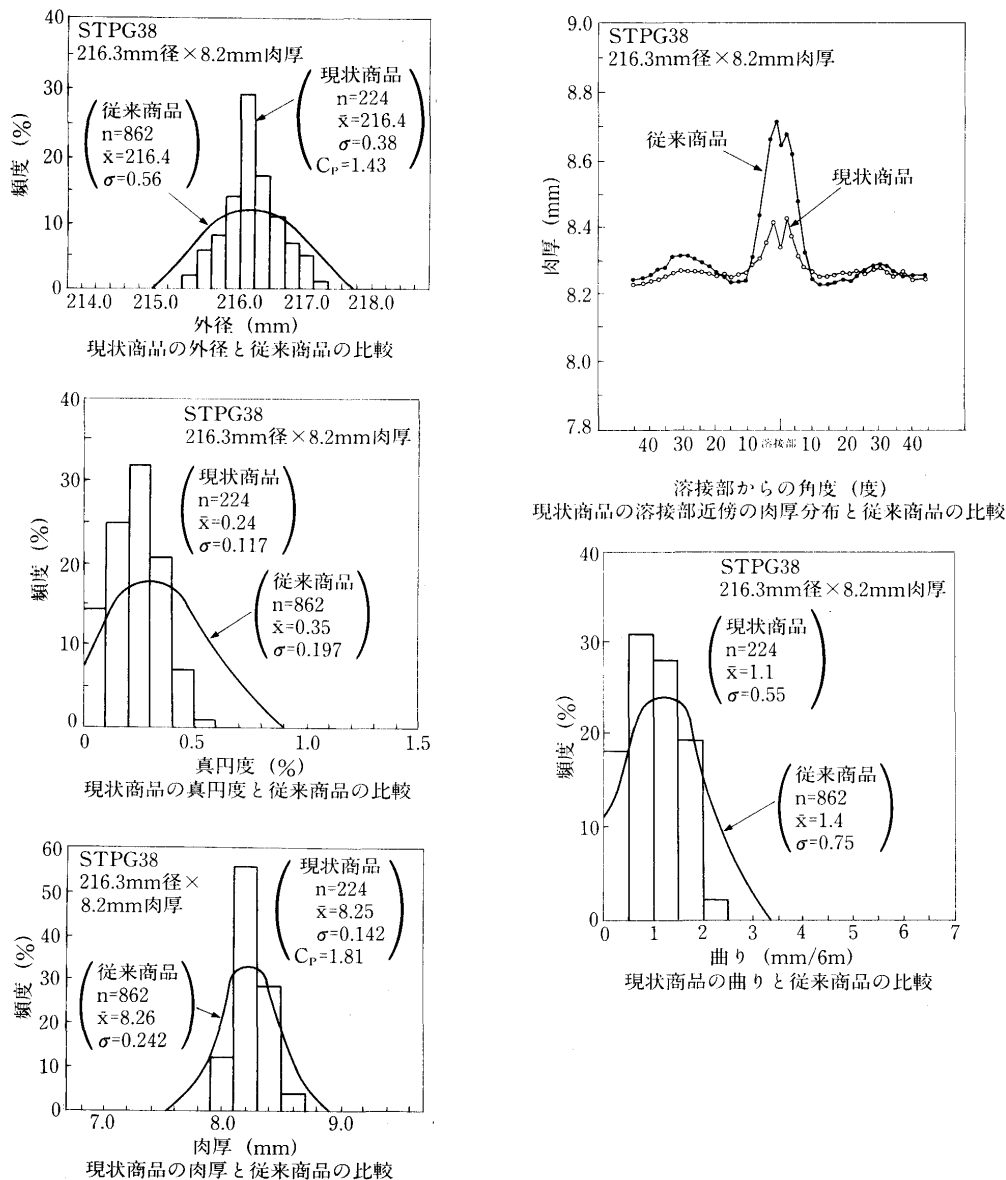


図18 寸法精度に関する従来及び現状レベル比較

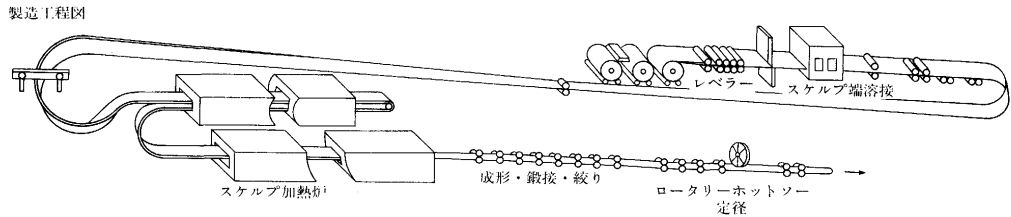


図19 鍛接鋼管製造工程図

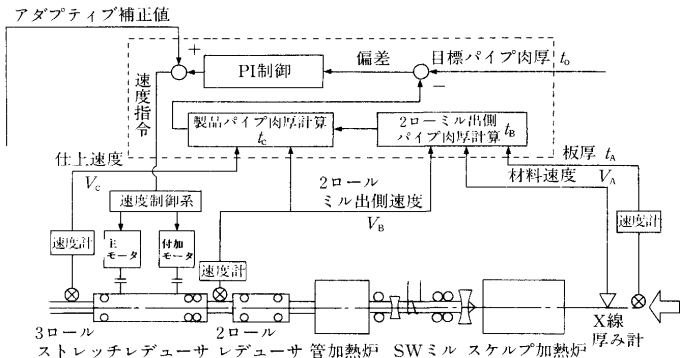


図20 パイプ肉厚制御ブロック図

精度に関する従来及び現状レベルの比較を示す²⁵⁾。

4・4 今後の課題

技術の開発・改善により寸法精度は大幅に向上したが、まだ成形調整作業、内外面ビード高さ調整などはオペレータの経験に依存する度合いが残っており、更に踏み込んだ技術改善が必要である。また、今後の課題としてアズロール品に冷間仕上げ品と同一レベルの寸法精度要求に答えられるような努力が求められている。

5. 鍛接鋼管プロセス

5・1 製造プロセス

鍛接鋼管の製造工程を図19に示す。製造方法は熱延鋼帯をスリッターにより所定の幅に切断したスケルプを加熱炉、成形、鍛接、レデュースの工程を経て製造される。特徴としては、生産性が高く低グレード品を大量生産するのに適した製法である。また、1985年には従来の溶接法に代わって高周波溶接法を採用したERW+SR(ストレッチ・レデュース)方式の熱間連続ミルが出現し、現在にいたっている。

5・2 寸法精度向上のための注意点

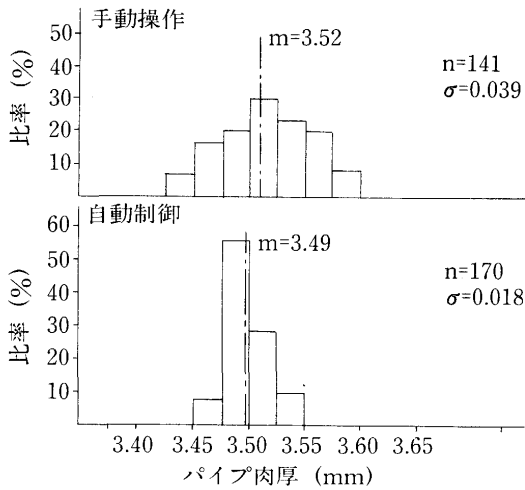


図21 肉厚制御効果

鍛接鋼管は熱間で製造される為、加熱条件あるいはレデュース条件等が寸法精度に影響を与える。

表5に各工程における寸法精度への影響度合いを示す。

5・3 改善開発技術

肉厚制御技術として、図20にパイプ肉厚一定制御方式の一例をブロック図で示す。この方式は、母材コイルの肉厚変動、圧延温度変動に応じて製品の目標肉厚になるようSRミルの速度を変え張力制御するものである。図21にその制御効果を示す。制御システム導入により肉厚バラツキがほぼ半減していることが判る²⁶⁾。

5・4 今後の課題

制御技術の導入等により、寸法精度が大幅に向上するとともに鍛接部の品質も向上した。それに伴い需要家の用途も多様化してきているので他品種分野への進出を図っていくことができよう。このためには更なる改善が、今後求められてくるだろう。

表5 鍛接鋼管製造工程における寸法精度への影響 (◎：影響大, ○：影響小)

工 程 項 目	加熱炉	成 形	鍛 接	レデュース	ホットソー	サイザー	矯 正
肉 厚	○	○	○	◎	—	—	—
外 径	—	—	—	○	—	◎	○
真円度	—	—	○	○	—	◎	○
長 さ	—	—	—	—	◎	—	○
偏 肉	—	○	◎	○	—	—	—
曲がり	○	—	—	○	○	○	◎

6. UO鋼管プロセス

6・1 製造プロセス

UO鋼管は、厚板を素材として製造され、サブマージドアーク溶接によるストレートの溶接部を持つ。主な用途は、石油・天然ガスを輸送するラインパイプである。図22にこの製造可能範囲を示す。

UO方式の代表的な製造工程を図23に示す。初めに造管溶接のための開先加工をエッジミラーで行い、C・U・Oの各プレス工程にて鋼板をO形状に冷間成形する。CO₂アーク溶接の仮付溶接、サブマージドアーク溶接の内・外面溶接を行った後に、寸法精度の向上と溶接による残留応力の除去のために拡管を行う。その後、水圧・超音波探傷等の検査、両管端の端面加工、寸法測定・外観検査等の最終検査、マーキングをへて出荷される。

6・2 寸法精度向上のための注意点

各製造工程の寸法精度への影響度合いを表6に示す。

鋼板は、エッジミラーによって、外周・板厚・アップセット率・拡管率より決まる仕上げ板幅に切削される。このアップセット率・拡管率は鋼管の外周・真円度等を決定する重要な因子である。その値は各ミルによって多少異なるが、通常前者は0.2%前後、後者は1%前後である。

鋼管の曲がりや溶接熱歪みによって発生するが、外周や真円度とともに拡管で矯正される。

また、ピーキングは主にCプレスのクリンプ形状によって管理されているが、拡管によって若干の矯正が可能である。

オフセットは、C・Uプレスのセンタリング及び仮付溶接時の矯正にて制御されている。

鋼管の板厚、長さは厚板で決まるが、両者とも拡管時に微かに減少するため、あらかじめその公差分が厚板に乗せられている。

UOミルにおけるこれら寸法制御は、計測が3次元で難しいことと、要求寸法が厳密であることから、ほとんどがオペレーターの手によってなされている。

6・3 改善開発技術

これまで、寸法制御に影響を及ぼす成形工程に求められてきた主な開発ニーズは、

①厚肉高強度鋼管製造技術の確立・製造可能範囲拡大

②設備の自動化

であった。このため、寸法精度向上に主眼をおいた開発事例は少ないが、①の開発においてC、U、Oプレス・拡管における成形挙動・成形力学の解析がなされてきた。その結果、適正Oプレス形状を与えるCプレスダイ形状・Uプレスパンチ形状等が確立された^{27)~31)}。同時に、ピーキングの低減には外周に対するクリンプ長さ比の増加が有効であり、真円度の向上にはUパンチ幅の増加が有効である事等が明らかにされた²⁸⁾。

上記以外の開発には、Oプレスのプラテンの水平圧下制御

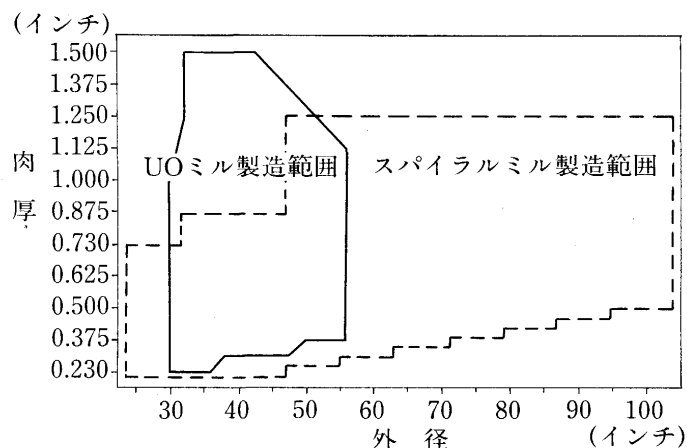


図22 UO, スパイラル鋼管の製造可能範囲

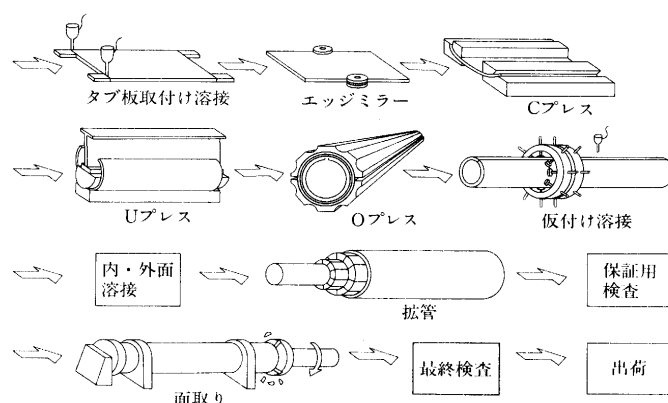


図23 UO鋼管代表製造工程

表6 UOミル各工程の寸法精度への影響
(◎：影響大, ○：影響小)

工程 項目	厚板	エッジ ミラー	Cプレス	Uプレス	Oプレス	拡管
外周		○			○	◎
真円度					○	◎
曲がり						◎
ピーキング			◎			○
オフセット			◎	○		
板厚	◎					○
長さ	◎					○

がある³²⁾。水平圧下制御とは、成形時にプレスの中央、端部の高さを検出し、これらの差から各端部シリンダー降下速度を自動で調整し成形を行う方法である。これによって、良好な外周精度が得られている。

拡管機における寸法精度向上の開発には、以下に示す事例がある。それは図24に示すような上下方向の曲がりの矯正を行う装置を設置し、拡管と同時に曲がり矯正を実施する方法である。これによって、図25に示すように従来よりも良好な曲がり・真円度が得られている³³⁾³⁴⁾。またこれに引き続き、曲がり検出方法を検討し、曲がり制御のシステム化を検討している。

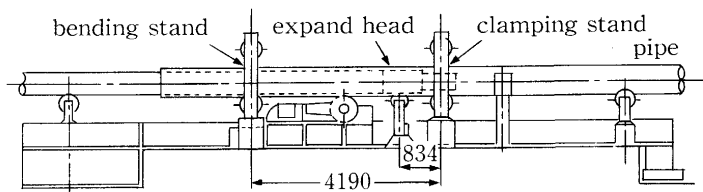


図24 鋼管の曲がり矯正装置を持つ拡張設備³⁴⁾

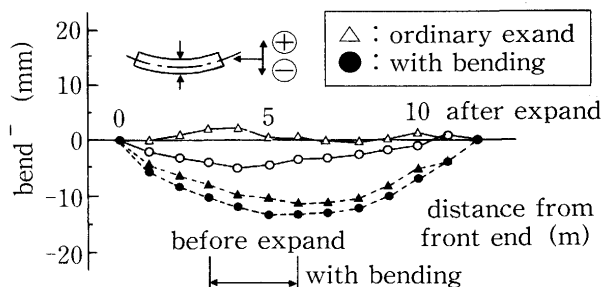


図25 鋼管の曲がり矯正装置を持つ拡張設備による効果³⁴⁾

6・4 今後の課題

UOミルではこれまで生産性向上のため、設備の自動化が進められてきた。今後ともこの傾向は続くものと思われ、対象作業として現在オペレーターの手によって行われている寸法計測の自動化が挙げられる。この寸法計測の自動化とともに、これによって得られた情報から寸法精度向上のための成形（拡張等）制御の開発が今後推進されるものと思われる。

また最近、UO鋼管の寸法精度に求められるニーズとして以下のものが挙げられる。これらに対応するために、今後寸法制御は徐々に発展して行くと考えられる。

①建築構造物（柱、鉄塔）への適用増加。

⇒曲がり・真円度等現在より厳しい寸法精度が要求されている。

②より劣悪な使用環境対応としての高合金クラッド化。

⇒この造管溶接・現地溶接には、高合金溶接金属の希釈等の理由から、厳格な開先寸法精度が必要とされている。このため、高精度のプレス成形・厳格な真円度等が要求されている。

7. スパイラル鋼管プロセス

7・1 製造プロセス

スパイラル鋼管は、熱延コイルを素材として製造され、サブマージドアーク溶接による螺旋状の溶接部を持つ。主な用途は鋼管杭・矢板に代表される土木建築鋼管である。図22にこの製造可能範囲をUO鋼管とともに示す。

スパイラル方式の一般的製造設備を図26に示す。スパイラルミルは、コイルカーから成形機入口までの前処理部、内・外面溶接機を含んだ成形溶接部および超音波探傷機・

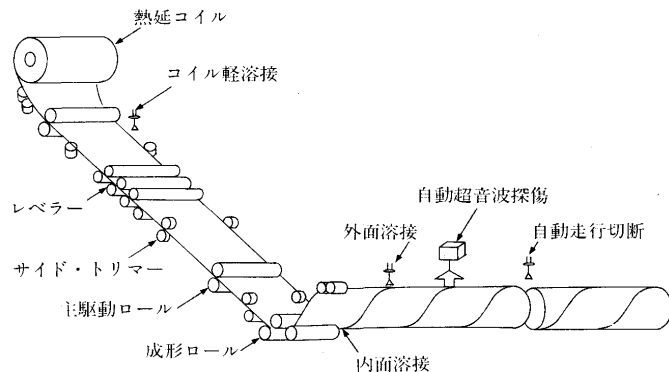


図26 スパイラル鋼管製造工程一例（出典：第112・113回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），（1986），p.207）

走行切断機を中心とした送り出し部よりなる。各種ミルタイプ・製造品種によって、設備の配置・内容に若干の相違はあるが、基本的にはほぼ同じである。

7・2 寸法精度向上のための注意点

スパイラル鋼管は、成形角を変えることによって同一幅のコイルから異なる外径の鋼管の製造が可能であるため、製造可能外径が広く、いかなる中間サイズにも対応可能である。また、シームがスパイラル状に全周均等に分布していること、連続製管で管端・管胴部ともに同一条件溶接であるため真円度・真直度等良好で寸法矯正を必要としない。

しかし、以下に示す要因によって寸法精度の悪化が生じる。

(1) コイルキャンバー

コイルキャンバーには、次に示す様な種類がある。

①熱延コイルの圧延中に生じるキャンバー

②スパイラル製管機入側におけるコイル継ぎの際に

●コイル端がアンコイルを外れたときに生じるコイル蛇行に起因するキャンバー

●コイル継ぎ精度の悪さによるキャンバー

これらのキャンバーが発生した時には、管外周長の変動・オフセットの発生・ルートギャップの変動等の現象が生じる。

(2) パイプ内残留応力

スパイラル鋼管の製造では製管上の特徴から管内に残留応力が発生する。残留応力は、鋼管強度には影響を与えず、通常の用途では問題を生じない。しかし、次に示す場合には真円度に悪影響を及ぼす。

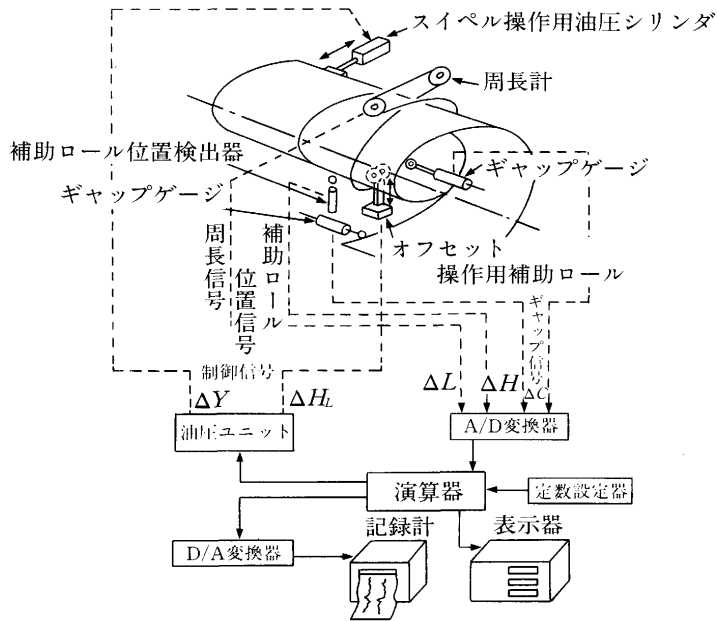
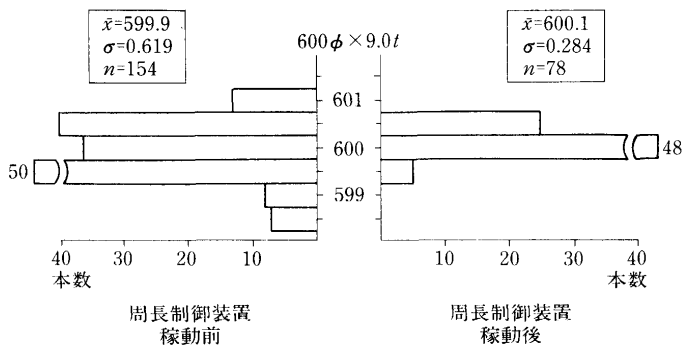
①鋼管矢板の継手材取付けのような管軸方向の大入熱溶接によって残留応力が開放され、管全体の応力バランスが崩れる場合。

②鋼管を1ピッチ以内に切断した時、内面スタンドのたわみによる残留応力のバラツキが顕在化する場合。

7・3 改善開発技術

7・3・1 外周長の自動制御

先に示したようなコイルキャンバーによる外周長・溶接

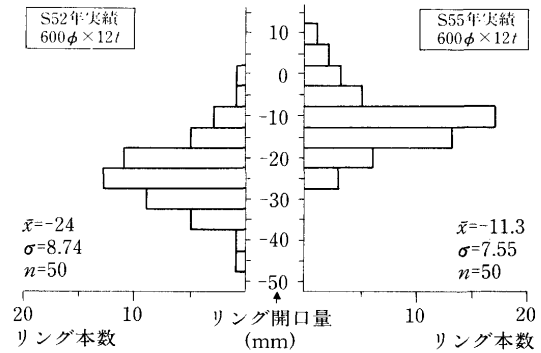
図27 周長ギャップ自動制御装置全体構成図³⁵⁾図28 周長ギャップ自動制御装置による効果³⁵⁾

ギャップの変動防止・精度向上のために、外周長の自動測定装置が開発され、更にこれを用いた周長ギャップ自動制御装置が開発・実用化された。この概略を図27に、これによる効果を図28に示す³⁵⁾。外周長の変化量はスチールバンドによって計測され、ギャップ量はタッチロールを用いて計測される。この測定結果を受けて、外周偏差は補助ロール昇降量（強制的にオフセットを付与し、管外周長を制御）によって補正され、ギャップ量はスィペルフレームの旋回量によって調整される。これらは相互に干渉し合うため、測定結果から演算器が調整量を決定し自動制御装置に指示を与える。

また、外周測定装置に非接触変位計を用いた装置³⁶⁾も考案されており、この装置では外周長の連続的な測定を可能としている。

7.3.2 残留応力の自動制御

管体内の残留応力は、先に示したように真円度を悪化させる場合が生じる。この残留応力は、材料である熱延コイルの降伏強さ、板厚の変化に大きく左右される。管体内の残留応力を減少させるためには材料強度の変化に対応して

図29 残留応力自動制御装置による効果³⁵⁾

成形加圧量を調整する必要がある。このため、材料強度の変化を成形反力測定用のロードセルで確認し、その荷重の変化に対応してヘッシュ式製管機のNo.1 ロールを自動的に加圧調整できる装置³⁵⁾が開発された。この結果、残留応力に直接関係するリング開口量の望ましい値を安定して得た(図29)。

7.4 今後の課題

造管工程の自動化は、生産性向上のニーズから考えてより一層進展するものと考えられる。従って、自動化のための形状測定技術も開発が進み、そのデータに基づいた寸法制御技術の導入が今後の傾向と考えられる。こういった制御技術の進展に伴って、寸法精度が向上しスパイラル鋼管の用途も多様化するものと考えられる。一例としては、継手精度を必要とする水道管や柱等の建築構造物が挙げられる。

文 献

- 1) 佐山泰弘, 江島彬夫, 船生 豊, 間口龍朗, 富樫房夫, 阿部英夫, 桜田和之, 田口芳男: 川崎製鉄技報, 13 (1981), p.1
- 2) 船生 豊, 松岡逸雄, 奥村 精, 村上昭一: 川崎製鉄技報, 14 (1982), p.156
- 3) 安田武生, 鈴木洋一, 井上 誠, 原 英栄, 佐藤克二: 材料とプロセス, 1 (1988), p.1578
- 4) C. Hayashi and T. Yamada: Proc. 1st ICTP, 2 (1984), p.1254
- 5) 林 千博, 山田建夫, 宇多小路勝, 平尾文樹: 塑性と加工, 24 (1983), p.1078
- 6) 山田建夫, 森部憲二, 松倉節夫, 重松直司, 吉岡浩二, 助川 南, 川端広己: 鉄と鋼, 70 (1984), S1153
- 7) 船生 豊, 奥村 精, 紺屋範雄, 林 保之, 岡 弘, 今江敏夫: 川崎製鉄技報, 18 (1986), p.160
- 8) 奥村 精, 紺屋範雄, 岡 弘, 粕谷利昭: 川崎製鉄技報, 22 (1990), p.266
- 9) H.J. Pehle: "New RST Process Manufacturing Systems Automate the Stretch-Reducing of Tubes", Proc. ITA Cong., (1991)
- 10) C. Hayashi, M. Utakoji, T. Yamada, M. Watanabe and R. Nakanishi: Trans. ISIJ, 28 (1988), p.440
- 11) 森部憲二, 山田建夫: 材料とプロセス, 2 (1989), p.1493
- 12) M. Yamada and T. Yamada: Proc. 3rd ICTP, 2 (1990), p.701
- 13) 森謙一郎, 小坂田宏造, 三原 豊, 平川智之, 福田正成: 塑性と加工, 28 (1987), p.1054
- 14) 第3版鉄鋼便覧, 条鋼・鋼管・圧延共通設備 (日本鉄鋼協会編), (1980), p.1018 [丸善]
- 15) 同上, p.1025

- 16) 同上, p.1158
- 17) 同上, p.1187
- 18) 同上, p.1189
- 19) 岩崎全良, 鈴木紀生, 西元善郎, 小谷 学, 藤井教嗣, 中野百合雄: R・D神戸製鋼技報, **37** (1987) 1, p.19
- 20) 門永敏樹, 藤井教嗣: R・D神戸製鋼技報, **37** (1987) 1, p.15
- 21) 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), p.236
- 22) 居城三郎, 菅昌徹朗, 大脇錠治, 稲垣慎太郎, 藤堂邦夫, 江崎和朋: 日本鋼管技報, **121** (1988), p.17
- 23) 杉江善典, 唐鎌勝則, 渡辺修三, 香川正弘, 笠原博二, 板谷 進: 川崎製鉄技報, **22** (1990), p.245
- 24) 平光雅司, 大出文昭, 薄井輝久, 津田耕三: 材料とプロセス, **3** (1990), p.1287
- 25) 阿高松男, 渡辺 豊, 森 紘一, 鈴木典明, 茶野善作, 村山 博: 製鉄研究, (1988) 328, p.1
- 26) 永島又次郎, 山下了也, 荒井 攻, 濱田誠己, 真忠達明: 住友金属, **39** (1987), p.73
- 27) 阿部英夫, 比良隆明, 中川吉左衛門, 山本武司, 小西博典, 坪井潤一郎: 鉄と鋼, **66** (1980), A45
- 28) 杉村重幸, 白田松男, 広川登志男, 河野 彪: 鉄と鋼, **66** (1980), A49
- 29) 福田 隆, 馬場善禄, 玉置年宏, 矢村 隆, 河合和男: 鉄と鋼, **66** (1980), A53
- 30) 平 忠明, 三原 豊, 石原利郎, 竹原準一郎, 首藤知茂: 鉄と鋼, **66** (1980), A57
- 31) 矢村 隆, 河合和男: 塑性と加工, **22** (1981), p.968
- 32) 石川知己, 高橋 暁, 山河 昇, 嶺 義輔: 鉄と鋼, **70** (1984), S403
- 33) 森部憲二, 山田健夫, 岸 伸典, 田中貞夫: 材料とプロセス, **1** (1988), p.606
- 34) 森部憲二, 山田健夫, 岸 伸典, 田中貞夫: 材料とプロセス, **1** (1988), p.1569
- 35) 三瀬真作, 吉富英雄, 大山昭男, 田島政弘, 近藤勝也: 住友金属, **33** (1981), p.44
- 36) 今井一郎, 柿田和俊, 梶崎満生, 天野芳隆: 鉄と鋼, **67** (1981), p.2685