

電縫管の製造技術の動向と課題

Manufacturing Technology for ERW Pipes, Present and Future

木 内 学*

Manabu KIUCHI

多くの産業分野で基本的な素形材として用いられている電縫管の製造技術は、製品品質の高度化、変種変量生産への対応、省人化・無人化の実現、等を目指して着実な進歩を遂げている。本稿では、この分野における成形理論・設計技術・操業技術および成形機に関する研究開発ならびに実用化の動向について紹介し、併せて今後の展望を述べる。

1. 緒 言

電縫管は、いわゆる継目無し管と並んで我国で製造される管材の主要な部分を占めており、ロール成形加工、すなわちタンデムに配置された一群のロールにより素板を段階的に円筒状に成形した後、その継目部を電気抵抗溶接法・高周波誘導加熱溶接法あるいはTIG溶接法・レーザー溶接法などにより接合して製造される。製造品種としては、一般配管用鋼管・一般構造用鋼管・機械構造用鋼管・油井用鋼管などの鋼管類が多いが、このほか各種のステンレス管・銅（合金）管・アルミニウム（合金）管・チタン（合金）管なども製造されており、石油・化学・建築・土木・住宅・自動車・航空機・電気・機械等の各産業分野において広範な用途に供されている。

近年、精錬技術・圧延技術の進歩による素板の高品質化・高精度化、あるいはロール成形技術・溶接技術・非破壊検査技術等の高度化により、電縫管の製造技術は急速な進歩を遂げ、製品の大径化、厚肉化、薄肉化、高強度化、高精度化、さらには製造ラインの省人化、フレキシブル化、変種変量生産化などが目覚ましく進んでいる。

本稿では、これら電縫管の製造技術の動向と今後の技術的課題について、主としてロール成形技術の立場から概説する¹⁾。

2. 成形理論およびシミュレーション技術

電縫管のロール成形加工は、各スタンドに配置された複数組のロール（多段のロール）による素板（コイルまたはフープ）の定常流れを伴う弾・塑性3次元曲げ加工として位置付けられ、塑性力学の立場からみると、板材の成形加工としては最も複雑な内容を有している（図1参照）。それゆえ、その理論的取り扱いも難解であり、素

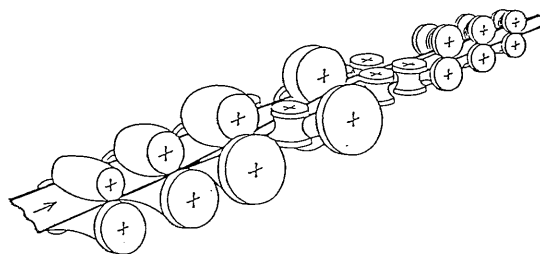


図1 電縫管のロール成形過程の概要

板の変形挙動とその特性を総合的に解析し得る手法の開発が遅れ、ロール設計・工程設計あるいは操業に関する諸問題に対処する有効な手段を欠いたまま、経験的知識に依存せざるを得ない状況が長く続いてきた。

1980年代に入り、コンピュータの飛躍的発達を背景として、塑性加工の各分野における数値シミュレーション技術の開発が相次いだ。電縫管の製造技術に関しても、ロール成形時の素板の変形挙動を総合的に解析し、その結果に基づいてロール設計や操業条件の最適化を図る試みが本格的に行われ、大きな成果を挙げつつある。それらのうちの代表的な解析手法はいわゆるエネルギー法に基づくものであり、その基本的な考え方および手順は、次のようなものである^{2),3)}。

(1)各スタンド間で成形中の素板が呈する3次元変形曲面形状をパラメータを含む関数で表示する。(2)この変形曲面に沿って素板の各要素が長手方向・幅方向の力の釣合条件を満足しつつ移動し変形する過程を上流側から下流側へ向って段階的に解析し、これにより、素板各部に発生する応力およびひずみの分布を計算する。(3)計算された応力・ひずみ分布より、スタンド間の素板の変形により消費されるエネルギーを求める。(4)上記パラメータの値を変化させつつ計算を繰り返し、上述のエネ

*東京大学生産技術研究所 第2部

ルギ消費率を最小化する変形曲面形状を探索し、その場合の変形、応力・ひずみ分布、それらより計算される変形仕事率、あるいはロールの駆動トルク等を近似解として得る。

図2に解析のフローチャートを、図3に素板の変形曲面形状と分割された要素の概要を示す。各スタンド間についての上述の解析を、入口ガイド～#1スタンド間から始めて、順次下流側へと進めていくことにより、成形過程全体における素板の変形挙動を知ることができる。その際、上流側での素板の変形形状や素板内に発生した応力およびひずみの分布は、下流側での解析の初期データとして用いられる。

この解析手法は、すでに幾つかの設計・生産の現場で用いられており、電縫管成形時に最も問題になる過大な縁伸びの発生を抑制するためのロール形状やロール設定

位置の設計、既存の成形プロセスの診断と改善指針の探索、製品のサイズ変更の際に際しての正常な成形可能範囲の予測、新規に成形ミルを導入する場合の望ましい仕様の決定、などに活用され多くの成果を挙げている。

3. ロール設計技術・CAD利用技術

素板の変形挙動の解析技術あるいは成形過程の総合的シミュレーション技術の発展とともに、電縫管製造用のロール設計技術も急速な進歩を遂げつつある。従来のロール設計は、文字どおり経験的知識をもとに、試行錯誤の繰り返しをととして、所要の成形を可能とするロールの形状・寸法を求める作業が行われてきた。たとえば、素板横断面上と製品横断面上との対応する各点を直線で結んで得られる3次元曲面（いわゆるペーパーモデル、図4参照）を描き、これを使用するスタンド数に応じ長手方向にて等間隔に分割し、分割位置の横断面形状をとりあえずのロール形状とし、これに修正を加えながら実成形に適したロール形状を求めていく、などの設計手法が用いられる。このようなロールの設計・製作には、多くの時間と労力が必要となり、長い間、この分野の技術的あい路となってきた。

近年、コンピューターによる多量の数値情報を短時間に解析・処理する技術、さらに製図技術・画像処理技術の急速な開発と応用が進み、いわゆるCADシステムが広く活用されるようになってきた。CADシステムの導入により電縫管製造の分野においても、ロール設計の高速化・合理化が急速に進み、過去の膨大な設計事例や蓄積されたノウハウを有効に活用しつつ、所要の目的を満足

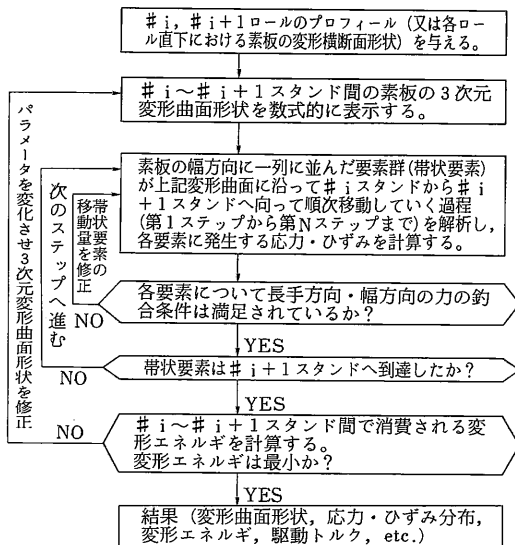


図2 素板の変形挙動の解析フローチャート

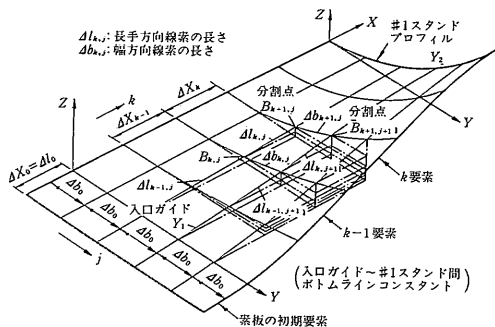


図3 変形曲面に沿う素板要素の変形解析に用いる分割(入口ガイド～#1スタンド)

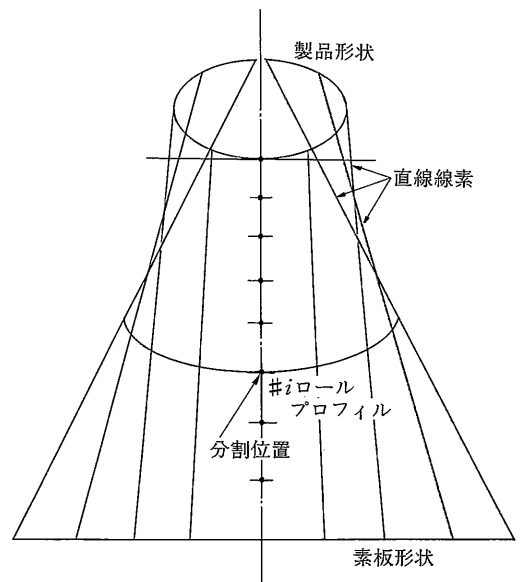


図4 ペーパーモデルの考え方と利用方法の概要

するロール形状・寸法を迅速に図面化することが可能となっている(図5参照)。さらに、CADシステムとCAMシステムとの連結により、ロール製作の現場も合理化・迅速化あるいは高精度化・高品質化が進み、ロールの設計・製作技術は一変しつつある⁴⁾。

しかしながら、このようなCAD技術の導入も、これが素板の変形挙動の適確な把握に基くロールの評価技術を伴わず、過去の実績データのみに依存した図面製作作業に終り、より高度の技術情報を創成する機能を持たない限り、その発展にはおのずと限界がある。そこで成形過程のシミュレーション技術とCAD技術との連結・統合化がこの分野における当面の重要な技術的課題となっている。この連結・統合化を実現することにより、CADシステムの機能を単なるドラフティング機能から文字どおりのデザイン機能へとレベルアップすることができる。

このような統合化の試みとして、前節で紹介した解析手法を中核とするロールの自動設計システムの開発も進められている。すなわち、設計あるいは修正されたロール群による成形過程での素板の変形挙動の解析を繰り返す、素板中のひずみや応力の分布状況を検討しつつ、素板に発生する縁伸びを最小化する。あるいは各ロールの駆動トルクを平準化する、などの条件を満足させ得るロールプロフィールを自動的に設計する手法の開発が進められており、すでに、多くの適用事例が報告されている⁵⁾。このような成形ロールあるいはパススケジュールの自動設計システムの基本的構成を図6に、また、この設計システムにより得られた所定の成形条件下で縁伸びの最小化を達成するロールフラワーの例を図7に示す。

さらに、上記自動設計システムは、単に定められたロール(スタンド)段数の下で、所要の条件を満足するロールフラワーの最適形状を求めるばかりでなく、適正なスタンド間隔や必要最小限度のロール段数の決定、素板の材質・寸法・機械的特性の影響を考慮したパススケジュールの設計、適切なロール設定位置の探索、などを可能とし、成形機や成形工程の最適設計にきわめて有用な情報を迅速に提供する機能を有している。この設計システムは、すでに各種の電縫管製造用のロールフラワーの設計等に利用され、既存の設計技術では到達できなかった高機能造管ラインの実現に効果を発揮しつつある。

4. 造管ラインの構成と素板の変形特性

現在でも広く用いられている従来型のロール成形機(パイプミルまたは電縫管ミルとも呼ぶ)を中心とする電縫管造管ラインの一般的な構成を図8に示す。このような造管ラインはアンコイラー・ルーバー・パイラー等の入・出側の諸設備を除いて、入口ガイドテーブル、所定幅の素板を順次円筒状に成形するブレイクダウンドンスタンドおよびクラスタースタンド(4～6段)、主として突合

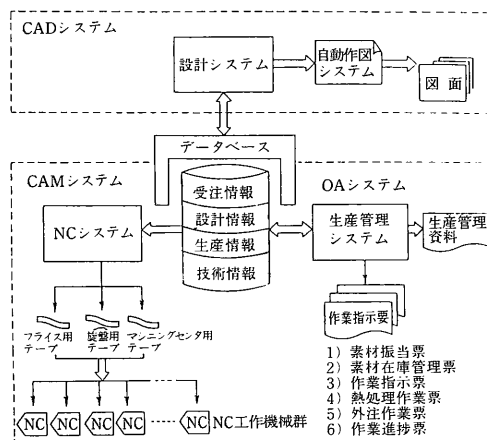


図5 成形ロールのCAD/CAMシステムの構成⁴⁾

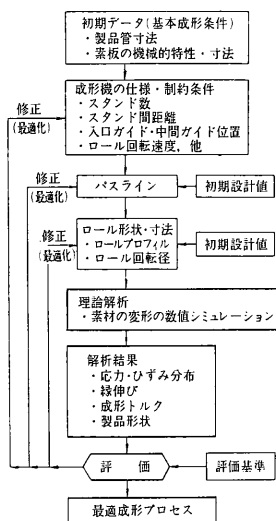


図6 自動設計システムの構成

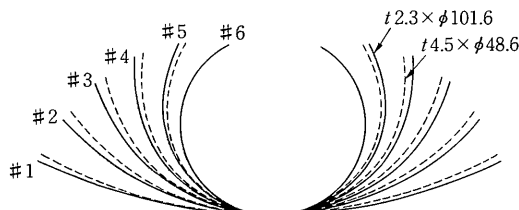


図7 縁伸びを最小とする最適ロールフラワー設計事例

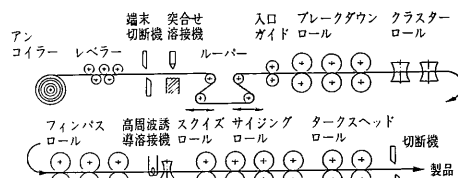


図8 電縫鋼管の製造ラインの基本的構成

せ部すなわち素板の両縁部の形状・寸法を整えるフィンパスタンド(3~4段), 突き合わせた両縁部を溶接するためのシームガイド・スクイズスタンドおよび溶接機, さらに管の定径を行うサイジングスタンド(3~4段), 矯正加工を行うタックスヘッド(1~2段), などからなる(図9参照)。このうち, プレックダウン成形からフィンパス成形までが電縫管のロール成形の中核をなす部分であり, 成形時の素板の変形に関するさまざまな問題が集約されて現れる。通常, 成形過程にある素板に対しては, ロールにより段階的な幅方向の曲げ変形が加えられるばかりでなく, ロール間を通過するごとに長手方向の曲げ・曲戻し変形が加わり, さらに, 素板各部が異なる空間的軌跡を通して成形されることに起因する長手方向・幅方向の伸び・縮み変形が加わる(図10参照)。すなわち, ロール成形を受ける素板の変形は幅方向に一樣ではなく, 各部分ごとに異なり, 特に両縁部には成形途中で長手方向の伸び変形(縁伸びまたはエッジストレッチ)が発生しやすく, これが過大になると, 円筒状に成形した際に縁部の座屈(縁波またはエッジウェーブ)が発生し, 溶接不良の原因となる。

電縫管の成形時に, ロール成形加工固有の素板の変形特性に起因して発生する問題を大別すると以下のようになる(図11参照)。

(1) 両縁部の成形不足: ロールによる曲げ成形であるために, 両縁部には必要十分な曲げモーメントおよび曲げ加工を補助する力学的拘束を加えることが困難である。その結果, 所要の幅方向曲げ変形を十分加えることができず, この部分は一様な円弧形に成形できないのが普通である。

(2) 縁波の発生: 上述の過大な縁伸び変形に起因して, 両縁部に縁波と呼ばれる弾性座屈や腰折れが発生しやすい。この縁波はロールプロフィールやパススケジュールが不適切な場合, あるいは肉厚・管外径比(t/D)が小さな場合に特に発生しやすい。

(3) 曲がり・ねじれの発生: 素板の幅方向各部に発生する長手方向伸び・縮み変形の不均一分布に起因して, 長手方向の曲がりやねじれが発生しやすい。特に, t/D が大きい場合にはねじれが発生しやすい。曲がりやねじれが発生すると, 突合せ部(シーム部)の空間的位置が一定しないため, 溶接不能となる。

(4) 真円度不良: ロール成形加工の特質として, 素板各部に加わる幅方向の曲げ変形は一樣ではなく, 円筒状に成形された半製品の横断面はさまざまなゆがみを有している(図9参照)。適正なフィンパス成形によりある程度の形状修正は可能であり, また後段のサイジング工程による矯正も期待できるが, 高真円度を獲得するのは容易ではない。

(5) 両縁部の増肉: 両縁部の形状・寸法を修正するた

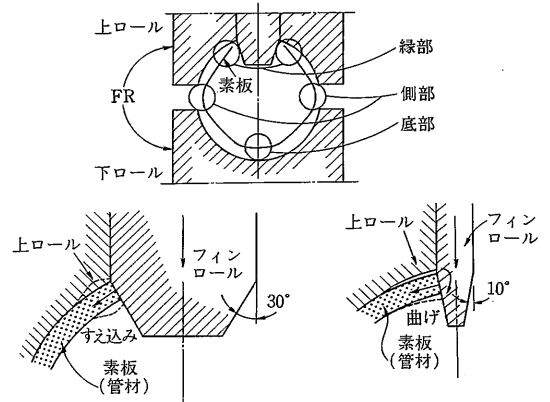


図9 フィンロールの構成とフィンロール内での素板縁部の変形挙動

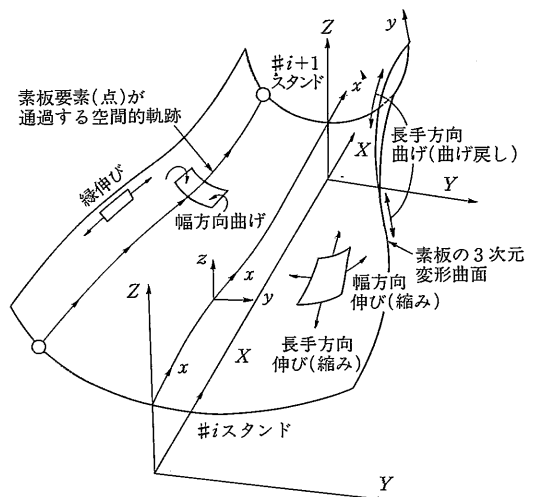


図10 成形過程における素板の変形挙動

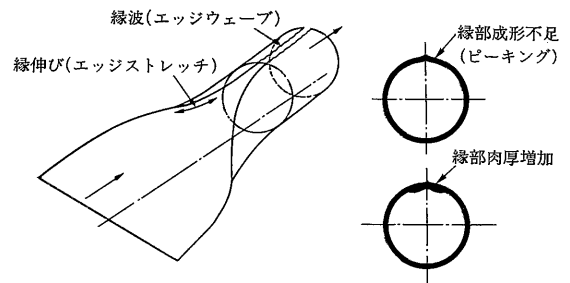


図11 電縫管の代表的形状不良例

めにフィンパス成形が行われるが, フィン形状や加える外径リダクションが適正でない場合には, 両縁部とその近傍の増肉を招き, 溶接部の形状不良やメタルフローの不整の原因となる。

このような形状不良の発生を防ぎ、素板の滑らかな変形と安定した操業を達成し、併せて成形機・造管ラインの合理化ならびに高生産性を実現するために、各種の技術的改善と新成形技術の開発が進められているが、以下にブレイクダウン成形からフィンパス成形に至る過程に限定して、主たる動向を紹介する。

5. ステップファンクションミルの高度化

ブレイクダウンロール・クラスタロール・フィンロールを用いて段階的に成形を進める従来型のロール成形機(ステップファンクションミル、図12参照)には、さまざまな機能上の制約があり、上述の各種問題に必ずしも十分対応できない面もあるが、現状では最も多く用いられており、その利用技術の高度化を促進することは、依然としてきわめて重要な課題である。

ステップファンクションミルの利用技術に関する近年の成果としては、まず、前節で述べたシミュレーション技術および設計技術の応用が積極的に行われるようになり、各スタンドに配置するロールのプロファイルおよび外径・スタンド間隔・パスラインなどを最も望ましい組み合わせにすることにより、従来期待できなかった高品質電縫管の成形が可能になりつつあることが挙げられる(図13参照)。シミュレーション技術の利用により、既存のミルやパススケジュールの診断と改善も適確に行い得るようになり、成形可能な寸法範囲の拡大や生産性向上に大きく寄与している。図14には、既存の造管ラインを対象とする一連のシミュレーションにより得られた製品管寸法・ロール径・スタンド間隔等の成形条件と安定した操業を実現するための縁伸びの管理目標範囲との関係を示す³⁾。このような技術情報の整備とともに、ステップファンクションミルによる電縫管の製造技術はさらに高度化することが期待できる。

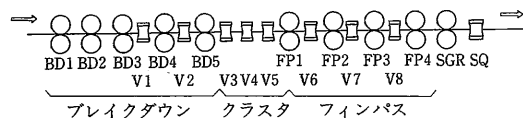


図12 ステップファンクションミルのロール構成 (例)

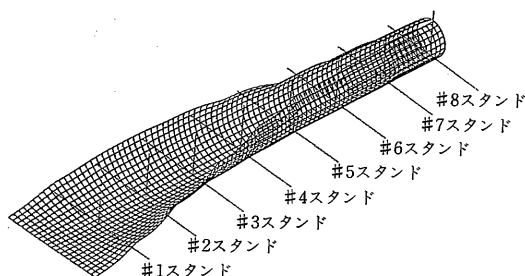


図13 素板の3次元変形曲面の解析事例

次に、多種少量生産に対応し得るステップファンクションミルの利用技術の開発も積極的に行われており、各種のクイックロールチェンジシステムの導入が進められている。現在採用されているクイックロールチェンジシステムとしては、(1)ロール交換を補助する各種の治具を考案し、上下のロール・軸・チョックなどを一体として迅速に取出し、あるいは組み込めるようにする、(2)予備の成形スタンドを用意し、オフラインでロールの組付け・調整を行っておき、スタンドごとロール交換を行う、(3)全成形スタンドを組付けた予備の成形機ベッドを用意し、オフラインで全ロールの組付け・調整を行っておき、ベッド・スタンドごとロール交換を行う、(4)成形機本体に異なる寸法・仕様の電縫管を対象とするラインアップした複数組の成形スタンド・ロールをあらかじめ組付けておき、成形機本体の平行移動・回転移動等により、所要の成形スタンド・ロールの組み合わせを素板の進行ライン上に設定して用いる、などの方式がある。クイックロールチェンジシステムの導入は、コストパフォーマンスとの適合を図ることが重要であり、技術的には可能であっても経済的に成立しない場合も少なくない。しかしながら、ニーズの多様化に伴う変種変量生産の進展や急速に深刻化しつつある技能労働者の不足等への対応が急がれている状況のもとで、ロール交換技術の自動化・省人化は、生産現場において今後必要不可欠になると考えられる。

さらに、上述の多種少量あるいは変種変量生産への対応策として注目されている技術として、冷間レデュ

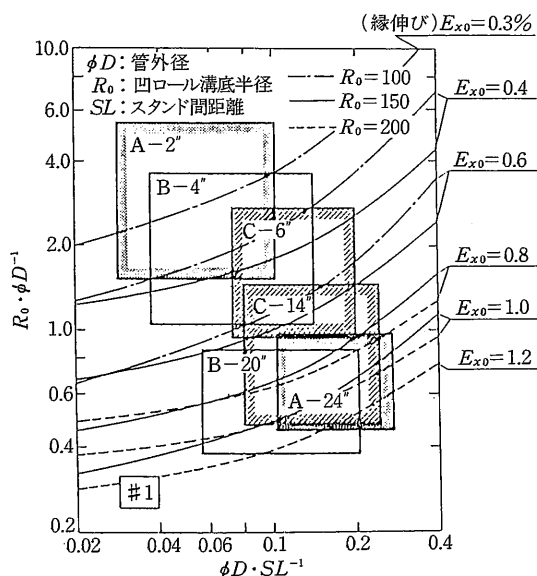


図14 管外径(φD)、凹ロール溝底半径(R₀)、スタンド間距離(SL)の組合せと縁伸びの管理目標許容値(ブレイクダウン#1スタンド)

サーの活用技術がある⁵⁾。これは、造管ラインの後段に複数組のレデュースングスタンドおよびロールを配置して、溶接後の電縫管に連続的な縮管加工を加え、所要の外径・肉厚を有する管製品を得ようとするものである。この技術の利用は、主として小径電縫管が対象となるが、成形時の管径をロール交換により細く変更する代わりに、同一ロールにより定径の電縫管を製造した後、引き続いてレデュースーにより管径・肉厚を要求に応じて変更することが可能となる。通常、レデュースーには多数のスタンドおよび孔形ロール（レデュースングロール）があらかじめ設置されており、それらの中から必要に応じて使用スタンドおよびロールが選択されて用いられる。用いられるレデュースングロールとしては2・ロール方式および3・ロール方式があり、3・ロール方式の方が1パス（1スタンド）当りの外径リダクションを大きくすることが可能であり、管の真円度を向上させる効果が大きい（図15参照）。

（図15参照）。

冷間レデュースーを用いる方法は、設備費の面で負担を増す可能性はあるが、生産性はきわめて高く、小径電縫管の製造技術としては今後大きく発展していくものと考えられる。ただし、レデュースング技術については、従来、必ずしも十分な研究が行われておらず、所要の管外径および肉厚を確実に得るための外径リダクションとスタンド間張力の制御のあり方にはいまだ不明の点も多く、今後、この面からの体系的検討が必要である。

既述のように、電縫管の成形時には素板の両縁部の曲げ成形不足が常に問題になる。このため、両縁部の曲げ成形度を向上させるためのさまざまな工夫がなされているが、従来広く採用されている方式は、いわゆるダブルベンド方式と呼ばれ、分割した上下ロールを用いて両縁部にできるだけ有効に曲げ力を加えようとするものである（図16参照）。この方式は、それ以前のブレイクダウンロールのみによる成形に比較して、両縁部の曲げ成形度を大きく向上させる効果を有してはいるものの、いまだ十分とは言えない。このため、近年、FEF法と名付けられた新しい方式が提案されている（図17参照）⁶⁾。これは、下ロールを分割しかつ各下ロール軸を上ロール軸に対して図に示すように傾けて設定することにより、上下ロール間を通過する素板がロール入口から出口へと移動するにしたがって、素板と下ロールとの接触が素板中央部から縁部へ向かって次第に移っていきようにし、素板両縁部と下ロールとの接触およびその曲げ変形を円滑化するとともに、上ロール直下を通過後の両縁部を下ロールによりさらに内側へと押し曲げることにより、両縁部の曲げ変形を促進し成形度を向上させようとするものであり、すでにその効果が実証されている。このようなロー

型 式	1スタンド当りの絞り率	全絞り率	肉厚変化
2ロール型レデュースー	3～5%	30～40%	若干増加
2ロール型ストレッチレデュースー	7～8%	50～60%	～30%減少
3ロール型ストレッチレデュースー	8～9%	～75%	～40%減少

図15 ストレッチレデュースーのロール構成と機能

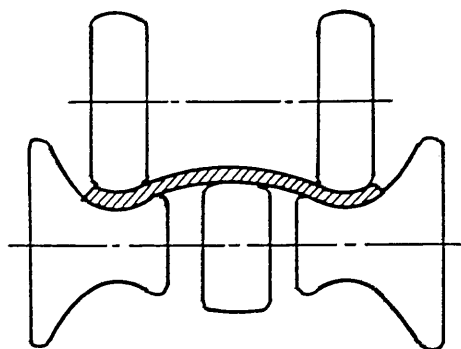


図16 ダブルベンド法におけるロール配置

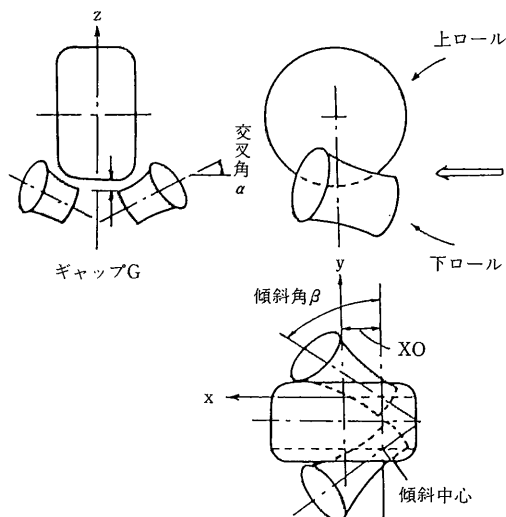


図17 FEF法におけるロール配置⁶⁾

ル配置のフレキシブル化により、従来の水平ロール方式では得られない成形機能の高度化が実現でき、後述する新しい構造・機能を有する成形機の開発と併せて、注目に値する技術と言える。

6. ケージフォーミングミルの発展

電縫管成形時の最大の問題点は、素板縁部が各成形ロール間を通過するごとに描く軌跡が、スタンド間での弾性回復変形の影響もあって、波打ち状になり、ほかの部分の軌跡に比較して長くなり、したがってこの部分に長手方向張力が加わり、加えて各ロール間を通過する際に素板縁部がロールに巻きつき、巻き戻され、長手方向の曲げ・曲戻し変形が繰り返され加えられることにより、縁伸びが助長され、縁部の形状不良や長手方向の曲がり・ねじれを誘起しやすいことにある(図10参照)。この縁伸びを低減させるため、既述のシミュレーション技術等を利用し、ロールプロフィールやパスラインの適正化を図る試みが続けられているが、同時に、成形機の構造やロールの配列方法についても種々の改善が進められてきた。すなわち、ブレイクダウン成形からフィンパス成形に至る過程に、小径のロール(平ロールまたはバレルロール)を多数配置して素板の3次元変形曲面を望ましいと考えられる形状に拘束しつつ成形し、縁部を含めて素板の流れをできるだけ滑らかにかつ単調な流線(軌跡)を描くようにして、縁伸びを極力抑制することを目指すケージフォーミング法(同ミル)が提案され中・大径電縫管の製造に各所で用いられている(図18参照)。

この成形方式は、素板の変形曲面形状の制御のみならず、一群の小径ロール(ケージロールと呼ばれる)の設定位置を一括して変更する機構を組み入れることにより、初期ブレイクダウン成形からフィンパス成形に至る中間過程については、ロールの兼用化を図り、ロール組み替えなしにロール設定位置の変更のみにより多サイズの電縫管の成形を可能とし、成形工程の合理化や生産性の向上をも目指している。一般に、中径以上の電縫管の製造

に際しては、ロールコストの増大が大きな問題であり、また、ロール重量自体も大きくなるため、組み替えに要する労力・時間も深刻な生産性阻害要因となっている。

このような意味から、ケージフォーミングミルは、中・大径電縫管用成形機として導入が始められ、生産性や操業性向上の効果が認められる中で、ケージロールの形状、配置、支持方法および設定位置の変更機構などに改良が加えられ、形式の異なる数種類の成形機(ミル)が開発され、その利用範囲は拡大しつつある。

現在稼動中のケージフォーミングミルとしては、(1)エッジベンディングロールおよび1~2スタンドのブレイクダウンロールを備え、その後はフィンロールに至る全成形過程をケージフォーミング方式とするいわゆるフルケージフォーミングミルと、(2)数組のブレイクダウンロールを配置し、それらの間を一群の小径ロールを装備したケージを用いて連結するセミケージフォーミングミルとがある(図19参照)。前者は、構造的には簡素化されているが、ロール設定位置の適正化機能に劣り、製品管サイズの変更に際して、多数のケージロールを望ましい位置に設定することが難しい面がある。後者は、複数組のケージを用いるため、個々のケージ内でのロールの位置調整は容易であり、製品管サイズの変更に際してきめ細かな対応が可能であるが、成形機の構造は若干複雑になる。

7. 新形式成形ミルの開発

近年、変種変量生産へのさらなる要求に対応すべく、成形ロールの兼用化・操業性の向上を指向した新しい成形法および成形ミルの開発が行われている。その代表的な事例として、リニアフォーミング法(同ミル)、CTA法(同ミル)、CBR成形法(同ミル)について紹介する。

リニアフォーミング法は、1~2段のブレイクダウンロールにより素板中央部の曲げ成形を開始した後、その両縁部には積極的な曲げ加工を施さないままに、ケージフォーミング法と同様に、左右の支持ブロック上に配置した一群の小径ロール(平ロール)により素板両縁部を外側から内側へ向かって抑え込むと同時に、途中に設置

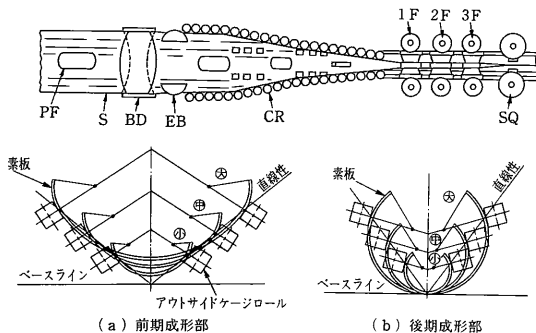


図18 ケージフォーミング法における小径ロール⁷⁾の配置と設定位置変更の考え方

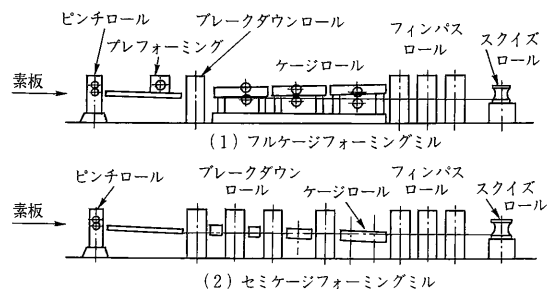


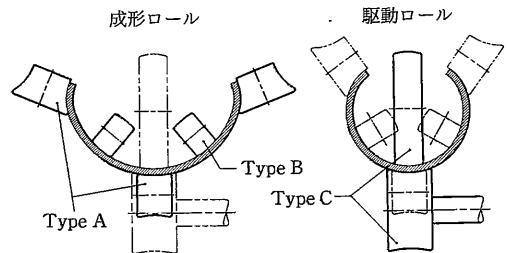
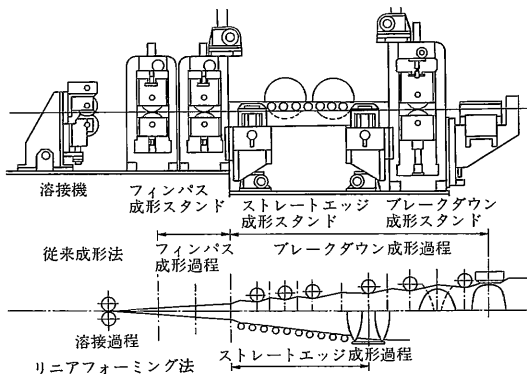
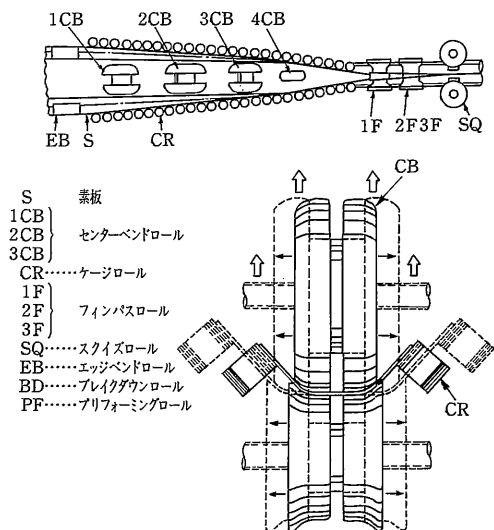
図19 ケージフォーミングミルの基本的構成

された上 (凸) ロールにより中央部を下方へ押し込みつつ、中央部の曲げ成形を促進し、概略U形に成形された半製品をフィンロールに導き、フィンロールによる圧下成形により、この段階で両縁部の曲げ成形を行いつつ全体を円筒状に成形することを特徴としており、いわゆるセンターバンドフォーミング法の一種と考えることもできる (図20参照)⁹⁾。リニアフォーミングミルは、フルケージフォーミングミル以上に簡素化した構造を有し、ブレイクダウン成形過程におけるロールの兼用化を実現すると同時に、ロール位置調整の簡易化による操作性の向上をその最大の特長としている。すでに多数のミルが稼動しているが、素板の変形の円滑化・安定化の面からみるといくつかの問題があり、特に、フィンロールのみによる素板両縁部の圧下成形を指向しているため、この過程での急激な縁伸びの発生とそれに伴う成形の不安定化を招きやすく、 t/D が特に小さい電縫管の成形に際しては縁波が多発する傾向があること、また t/D が大きい範囲では、縁部の成形不足と併せて成形中の素板のねじれ (揺動) が発生しやすく、同じく成形が安定しにくいことが指摘されている。そのため、成形初期には素板両縁部を積極的に曲げずに平板状のままとするリニアフォーミング法の当初の考え方を若干修正して、第1ブレイクダウンロールの手前に、両縁部の成形を行うエッジベンディングロールを配置する試みも行われている。

CTA法は、素板の幅と所要の製品管径に合わせてロールの設定位置を変更できるエッジベンディングスタンドを設け、さらに、兼用ロールを装備した3～4段のブレイクダウンスタンドの間を、それぞれ素板中央底部を支持するロールと左右対をなし素板両縁部を抑え込むロールを備えた3組の成形スタンドで結び、各ブレイクダウンロールとその間に配置した3組のロール群により、素板を概略円弧状断面を有する半製品に成形しつつフィンロールに導き、フィンパス成形により最終的な円筒状に成形することを特徴としている (図21参照)⁹⁾。この方式は、いわゆるサーキュラーバンドフォーミング法かつ既

述のセミケージフォーミング法に対応しているが、成形機の構造は大幅に簡素化されており、特に、製品管外径の変更に際して、ブレイクダウンスタンドの兼用ロールの位置変更と中間の支持ロール群の位置変更とが同期して行える機構を有しており、その分だけ操作性が改善されている。TCA法の適用事例はいまだ少なく、その評価は確定していないが、これまで説明してきたほかの成形法あるいは成形ミルと比較して、成形機能や操作性の面で決定的な利点を備えるまでには至っていない。

CBR法は、エッジベンディングスタンドで素板両縁部をあらかじめ成形した後、独立したブレイクダウンスタンドを用いず、素板中央部を上から抑え込むための左右に分割された凸ロール (インナーロール) と、素板両縁部近傍を外側から押し上げる多数の小径ロール群とにより、素板中央を含む一定部位を優先的に曲げ、この部位と両縁部間の管側部に相当する部位には曲げ変形を積極的に加えないまま両縁部を立ち上げた形状、すなわち、概略相対向する半円の間を直線で結んだごとき断面形状

図21 CTA法におけるロール配置の考え方⁹⁾図20 リニアフォーミングミルの基本的構造⁹⁾図22 CBR成形法におけるロール配置とインナーロールの構造の概要¹⁰⁾

を有する半製品を成形した後、これをフィンロールに導き、フィンロールにより圧下成形を加え、側部を左右に張り出させつつ曲げて円筒状に仕上げる方式を採用している(図22参照)¹⁰⁾。この方式は、ブレイクダウンスタンドを用いず、分割されたインナーロールと両縁部を支持する小径ロール群との設定位置を変更することにより、成形すべき管外径の変更に対応する機能を有しており、その意味ではいわゆるブレイクダウン成形過程におけるロールの兼用化を達成しており、また、管底部と側部との境界をいったんオーバーベンドした後に所要の曲げ半径にまで曲げ戻すことになるため、弾性回復の影響によりフィンパス成形終了後のシーム部の開度が小さくなり、突合せ形状が良好になりやすく、結果的にフィンパス成形時の外径リダクションが少なくてすむ、などの利点が指摘されているが、この方式もいまだ採用事例が少く、その評価は確定していない。

8. 数値制御成形ミルの開発

上述した一連の成形機の発展の流れは、成形ロールあるいは多数の支持ロールを用いて、成形中の素板の流れができるだけ滑らかになるように拘束し、縁伸びの発生を抑制して成形の安定化を図ると同時に、ブレイクダウン成形過程におけるロールの兼用化を実現しようとするものである。その目的は相当程度達成されたが、製品管寸法および材種の変更に伴うロール設定位置の変更および調整は依然としてその多くを人力に依存している。また、各成形方式は必ずしも素板の変形挙動に関する確かな理解に基くものではなく、多種多様な電縫管の製造に適した変形を素板に加え、望ましい製品品質を確保し、併せて、操業の安定化と生産性の向上とを達成するために求められる成形機能の柔軟性の面からみると、いまだ、多くの課題が残されている。

上述の各種ニーズに応え得る高度の機能を有する成形方式や成形機への模索が続いている中で、上述のリニアフォーミングミルやCTAミルの開発と時を同じくして、ブレイクダウン成形におけるロールの兼用化と成形機能の向上を期待し得る新しい設計思想に基く成形ロールを装備し、併せてロール設定位置の数値制御化を実現した高機能成形機および成形技術が開発された¹¹⁾。フレキシブルフォーミング法 (FFミル) と呼ばれるこの成形方式は、ロールプロフィールにインボリュート曲線を導入してプロフィール上の各点に連続的に変化する曲率分布を付与すると同時に、ロール設定位置を数値的に制御することにより、成形上最も望ましいと考えられるロール部位を同じく望ましい素板部位に選択的に当て、素板の滑らかな変形と精度の高い成形を実現しようとするものである(図23参照)。この成形機は、両縁部を優先的に成形するエッジペンディングロール(1段)、兼用ブレイクダウ

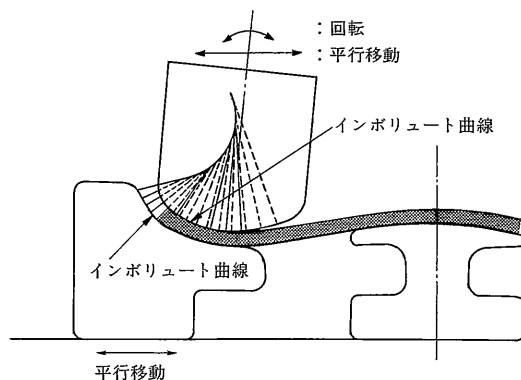


図23 FFミルのエッジペンディングロールの構成¹¹⁾

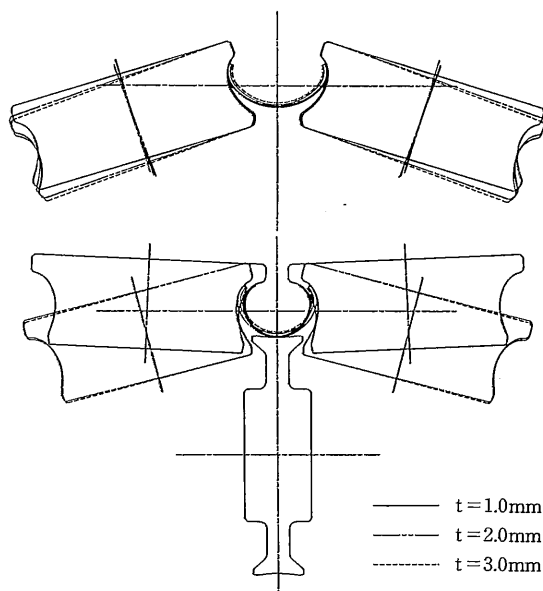


図24 FFミルにおけるロール設定位置変更の考え方¹¹⁾

ンロール(1段)、フレキシブルロール(4~6段)、フィンロール(3~4段)を装備し、また各ロールスタンドには、ロール位置およびロール軸角度を任意に変更できる機構と数値制御装置が組み込まれている(図24参照)。

この成形方式は、製品管寸法のみならず素板の機械的特性にも合わせて、用いるロールプロフィールの曲率と素板に加える変形の程度および拘束の形態とを任意に選択できるという意味から、高い成形機能と柔軟性を有しており、それ以前の成形方式と比較して、新しい世代の電縫管の成形技術と言うことができる。構造用鋼管・ステンレス鋼管等の製造用として、すでに、数台のFFミルが使用に供されているが、その本質的に優れた機能にふさわしく、高品質の鋼管を安定して生産することに成功し

ており、操業性にも優れていることが実証されている。

9. 結 言

本稿では、電縫管のロール成形技術の現状、特に、ブレークダウン成形過程を対象とする成形理論、シミュレーション技術、ロールおよびパススケジュールの設計技術、各種の成形方式や成形機の開発動向と課題について概説した。電縫管の成形については、素板縁部の曲げ成形をさらに効果的に行うエッジペンディングの方式、その際望まれるロールの形状と支持方法、ロール位置の変更を柔軟に行いうるスタンド構造、円筒状に成形後の横断面の真円度ならびに突合せ部の形状・寸法精度の向上のためのフィンロール形状およびフィンパススケジュール、安定かつ健全な溶接を達成するために要する溶接条件およびその制御技術、製品管寸法・形状の改善を効率的に実現するサイジング技術、など検討すべき点は多々残されているが、総じて、電縫管のロール成形技術は着実な進歩を続けており、製品品質の向上、製品管寸法範囲の拡大、成形プロセスおよび操業の合理化・省人化、各種加工技術との有機的結合による成形ラインの

複合化、などが今後共推進されるものと考えられる。

(1991年8月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学：日本塑性加工（日本塑性加工学会編）（1986），p. 674
- 2) 木内 学：塑性と加工，27—300（1986），p. 874.
- 3) 木内 学：塑性と加工，28—312（1988），p. 49.
- 4) 松根 巖：塑性と加工，23—259（1983），p. 786.
- 5) 三上一雄：第136回塑性加工シンポジウム論文集（1991），p. 11.
- 6) 山田將之：第136回塑性加工シンポジウム論文集（1991），p. 45.
- 7) 木内 学：ロール成形（日本塑性加工学会編）（1990），p. 131〔コロナ社〕
- 8) F. Nicolai: Proc. ITA Conference "TUBE TECH 87"（1987），p. Ferrous Session.
- 9) D. During: Proc. ITA Conference "TUBE TECH 87"（1987），p. Ferrous Session.
- 10) 橋本裕二：第136回塑性加工シンポジウム論文集（1991），p. 35.
- 11) T. NAKATA: Proc. ITA Conference "TUBE 89"（1989），No. 8917.