

ロールフォーミング加工における最適化問題

Optimization Problems on Cold-Roll-Forming Process

木 内 学*

Manabu KIUCHI

ロールフォーミング加工は、板材の成形法として大きな役割を果たしつつあり、その製品は、土木・建築・船舶・航空機・自動車・住宅・電気産業など多くの分野において用いられている。ここでは、その全体像と問題の広がり・相互の関連性などを総括的に述べ、それらの学問的・技術的側面と現時点における展望を論じ、さらに加工プロセスの最適化を図るために必要な今後の研究課題の分析とその方向を示す。

1. はじめに

ロールフォーミング加工は、ロール成形・Cold-Roll-Formingとも呼ばれ、タンデムに並んだ成形ロールの間に、切板・フープ材・コイル材等種々の形態の板材を通し、それらに漸進的且つ連続的に幅方向の曲げ加工を施し、所要の形状・寸法を満足する断面と長手方向に真直または所定の曲率を有する管材、型材、プレート類、サッシ類などを成形する塑性加工法の一つである。その製品の用途は、建築・土木構造用部材、船舶・航空機・自動車・家電製品・プレハブ住宅用部品、等多岐にわたっている。加工技術としては、圧延・板金プレス加工にも比すべき大きな分野を占めているが、比較的新しい加工法であるために、その技術的基盤の形成が著しく遅れているのが現状である。

筆者らは、このロールフォーミング加工の学問的体系化を目指して一連の研究を進め、過去数年間にわたり10数回の学会発表をも含めて、様々な角度から問題の検討を行ってきた。その結果、当初の目的はほぼ達成し得たものと考えているが、このことはもちろんロールフォーミング加工に関する全ての問題が解明し尽されたという意味ではなく、むしろこの加工法の全体像と問題の広がり・相互の関連性等を明確に認識し得たという意味にすぎない。すなわち、筆者らによるこれまでの研究により、ロールフォーミング加工に関する問題の内部構造あるいは骨格が明らかになり、その間隙を埋める実質的研究は今後に待つところが多いのが現状である。

本報では、このような問題の内部構造を総括的に述べ、その学問的・技術的側面の現時点における展望を論じ、合わせてこの加工法または加工プロセスに関連する最適化問題の分析とその方向について述べることにする。

2. 問題の把握と分析

ロールフォーミング加工に関する諸問題を実際的な面

から整理すれば、大略次のようになる。

- 1) ロールプロファイルの設計、すなわち成形量配分・パススケジュールの最適化など成形プロセスの計画・分析・設計等に関する問題
- 2) ロールの位置制御・圧下制御等を含む製品の形状・寸法の制御、速度制御、など成形プロセスの制御および管理に関する問題
- 3) 成形荷重・成形トルクおよび消費動力などの算定方法・配分方法等に関する問題
- 4) 所要の機能と精度を満足する成形ロールの構成・製作・配置等に関する問題
- 5) 成形機の構造・強度・精度、その他駆動方式・ロール組替方式などを含む成形機全体の設計・製造上の問題
- 6) 生産ラインの構成とライン全体の制御、さらに切断機・レベラー等ラインを構成する個々の付属設備に関する問題

これらの実際上の諸問題の根底には、ロールフォーミング加工における材料の変形挙動、すなわち成形過程において材料が受ける変形の形態とそれらに適應する材料の挙動や特性などにかかわる基礎的な問題がいくつかある。たとえば、

- 1) 成形過程において各スタンドのロールからロールへと移行する際に材料の各部分がたどる変形経路の形態とその決定のメカニズムに関する問題
- 2) 材料各部の変形形態と製品形状との関係に関する問題
- 3) 各種成形条件因子が材料各部の変形形態に与える影響とそのメカニズムに関する問題
- 4) 成形過程における材料の変形挙動の一般的規則性の有無、ロールフォーミング加工特有の変形条件などの把握・分析に関する問題
- 5) 上記諸問題に対する材料の機械的特性の影響あるいは関連性に関する問題
- 6) 各成形ロールが材料に加える拘束の形態、あるいはロール・材料間の接触圧力分布とその決定のメカ

* 東京大学生産技術研究所 第2部

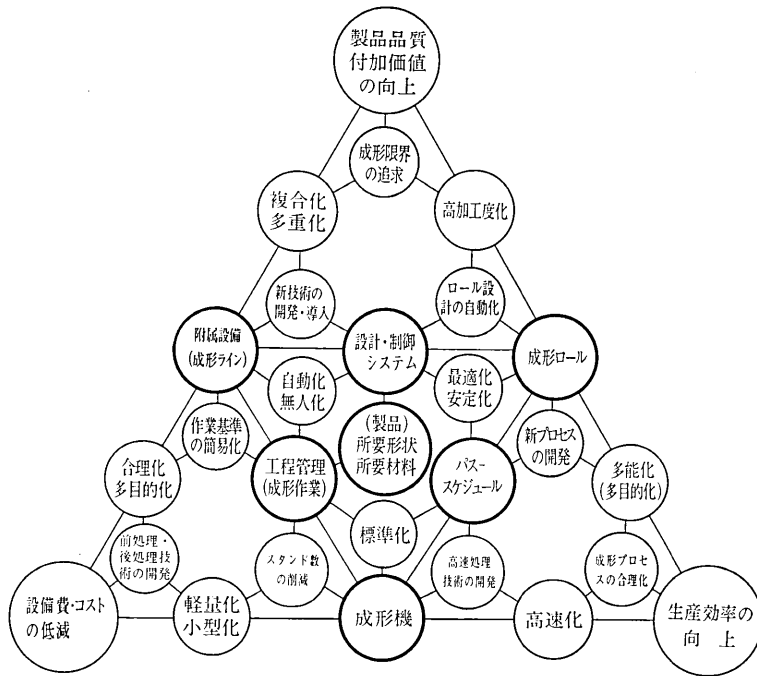


図 1 ロールフォーミング加工システムの構成要素と問題

ニズムに関する問題、さらにこれらの要因と材料の変形形態との関係に関する問題

- 7) 成形荷重・成形トルクあるいは材料の実成形速度の決定のメカニズムに関する問題、さらに各種成形条件因子がこれらに与える影響に関する問題

などである。これらの基礎的諸問題の解明が、ロールフォーミング加工に関する多様な実際の問題を考察するうえに必要不可欠の基盤となる。

しかしながら、これらの個々の問題については、既に幾度か論じてきたので、ここでそれを繰り返すことは避け、以下、これらの問題をも含めてロールフォーミング加工の全体のシステムを、より総括的に論じることとする。

ロールフォーミングの加工システムを構成する基本的要素を、いわゆるハードウェア・ソフトウェアの側面から分類するとそれぞれ次のようになる(図1参照)。

- (1) 成形ロール
- (2) 成形機
- (3) 付属設備または成形ライン
- (A) パススケジュール
- (B) 工程管理または成形作業
- (C) 設計・制御システム

ここで(A)のパススケジュールは、ロールフラワーあるいは成形量配分・パスライン等、材料各部の変形過程を規定する要因の総称である。また(C)は製品設計・ロール設計・製品形状制御・速度制御等の手法ならびにこれらを実現するシステムを示す。

これらの各要素は、それぞれ独立に顕在するものでなく、相互に結びつき多数の副次的な要素ならびに問題を内包している。それらの全てをここに示すことはできないが、そのうち主たるものを列挙することにより、問題の内部構造の概略を述べると次のようになる。

第1に成形ロールを核として主な問題を列挙してみると、パススケジュールならびに設計・制御システムとの結びつきの面において、製品形状の制御をも含めたプロセスの安定化の問題、ロール設計の自動化の問題、さらにはパススケジュールの最適化問題などがある。この他にも成形限界の追求を含めての製品の高加工度化の問題、ロールの成形機能の分析と有効利用・拡充による多能化(多目的化)の問題などが考えられる。

第2に成形機を核として考えると、パススケジュール・工程管理・成形作業との結合の面において、小型化軽量化の問題、作業の簡易化・軽微化を含めての標準化の問題、成形前後の付属作業・処理等も含めての高速化の問題、さらに実的な意義の大きいスタンド数の削減の問題などがある。

同様に第3の成形ライン(付属設備)を核としてみると、工程管理・成形作業および制御システムとの結びつきの面において、無人化・自動化が最大の問題となり、その他に設備の改善や合理化・多目的化の問題、作業基準の簡易化・標準化の問題、新しい技術の開発や別の分野の加工技術の導入による成形内容の複合化・多重化などが今後の問題としてあらわれてくる。

上述の個々の問題に関しても相互に直接的・間接的な

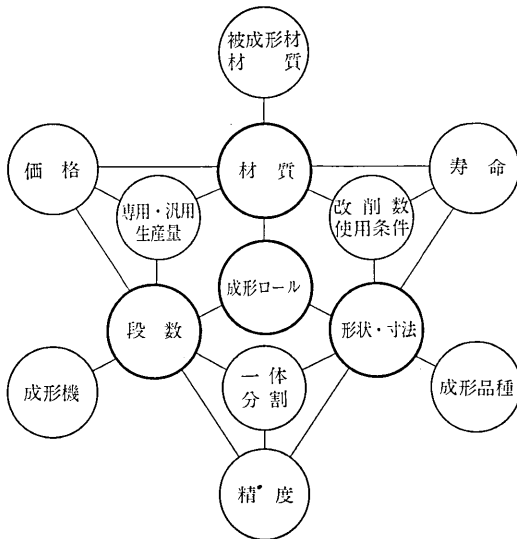


図2 成形ロールに関する因子と問題

関係が存在し、それらの間にはさらに細かくより基礎的な問題が多数存在する。それらの問題の多くは、究極的にはロールフォーミング加工の成形過程における材料の変形挙動にかかわる既述の基礎的諸問題に帰着することになる。その詳細な検討はここでは省略し、上に述べた基本的な要素について、以下個別的に詳述する。なお図1には上述の基本要素相互間の結びつきと関連する諸問題の関係の概略を示してある。

3. 成形ロール

ロールフォーミングの加工プロセスを規定する最も基本的かつ重要な要素は、各スタンドに組み込まれ材料に直接変形を加えるロールのプロフィール(形状・寸法)あるいはそのシーケンスとしてのロールフラワーである。

この成形ロールを構成する基本要素は、

- 1) 形状・寸法(ロールプロフィール)
- 2) 材質
- 3) 段数(スタンド数またはロールの許容総組数)

である(図2参照)。

各スタンドのロールプロフィールまたはそのシーケンスとしてのロールフラワーは、成形過程における材料の変形挙動・材料各部の歪経路およびその結果としての製品形状や残留応力を支配する要素であるという意味から、その設計の良否は、製品品質・成形限界・成形作業またはプロセスの安定性などを大きく左右する。また、たとえ外観上の製品の形状寸法は所定の目標値を満足しうるとしても、そこに至る成形のプロセスあるいはそれを実現するロールプロフィールは無数にありうるので、問題はそこから所定の評価基準に対して最適なもの如何にして見出すかという点にある。しかしながらこの問題は極めて高度な内容を有しており、容易に解を見出す

ことができないばかりでなく、解を求める方法自体がほとんど判明していないのが現状である。したがって現在の技術レベルにおいては、最適化を図るというよりもむしろとりあえず一つの解を求めることが最大の課題となっている場合が多く、この点に関する手法の追求と技術的展開・システム化が急がれている。現在、この問題に関しては二つの側面からのアプローチがなされつつある。その一つは成形中の材料各部の変形挙動を細かく分析し、その結果とロールプロフィールとの対応から、ロールプロフィールのあり方とその物理的意味を明らかにしていこうとするものであり、他はロール設計の手順をシステム化し、従来得られている経験的データをもとにロール設計を自動化しようとするものである。両者の研究が総合され、各種のロールフラワーに対応する成形プロセスのシミュレーションが可能となれば、実際の意味をもつロール設計の自動化と最適化が実現し、ひいては新しいプロセスの開発等も十分可能になるものと考えられるが、そのような段階に至るには今後かなりの努力と日時を要するであろう。

材質的な面からみると、ロール用材料としては一般に次のような特性が要求される。(1)耐摩耗性が大きい。(2)衝撃に強く表面剝離を起さない。(3)焼付が起りにくい。(4)仕上面が美麗である。(5)加工が容易で高精度が得易い。(6)寿命が長く生産性が良い。さらにこのような要求を満すために(1)硬度が高く靱性が大きい、(2)焼入れ深度が大きく内部硬度の低下が少ない、こと等が必要となる。これらの要求の全てを同時に満足することは通常困難であるため、一般には、炭素工具鋼・軸受鋼・冷間ダイス鋼・Mo系高速度鋼・V系高速度鋼などを用途に応じて使い分けることが行われている。

しかしながら、成形ロールはプレス加工におけるダイス等と同様、かなり高価なものとなり、その経費削減は生産コスト低減化のためにも真剣に検討されねばならぬ問題である。そのためにはまずロールの果す成形機能の正確な把握が必要となる。すなわち、通常の成形プロセスにおいては、プロフィール全域にわたってロールと材料が接触している場合は稀であり、接触の仕方あるいは接触域に発生する圧力の値も成形品種や成形条件により、さらには凸ロール・凹ロールの相違により著しく異なるのが普通である。したがって、ロール摩耗を抑制し、寿命を長びかせ、ロールの利用効率を高め、その成形機能を十分発揮せしめるためには、ロールと材料間の接触形態あるいは接触圧力分布などに関して検討を進め、プロフィール上の高接触圧力発生領域におけるロール・材料間の相対すべり速度を最小にすること、換言すれば実際の等周速径が高接触圧力発生域におけるロール径に一致するよう、ロール径の決定には十分配慮すること、ロール

を分割ロールにして必要な部分にのみ高級材料を用いること、アイドラーロールを用いて不必要なロール材料間のすべりを除去すること、当該スタンドで要求される成形領域と成形内容を満足する必要最小限度のロールを用い不必要にロールを多用しないこと、中間ガイド等により材料の流れすなわち通板をできるだけなめらかにすること等に関して従来以上に積極的に検討する必要がある。ただし、これらの問題の基本となるロール材料間の接触問題に関しては筆者等による一連の研究があり、多くのデータが整理されているので、今後の実際面への活用が期待できる。

ロールの段数（スタンド数またはロール総組数と同義）は、所定の成形断面の形状・寸法、すなわち断面深さ・曲げ部の数と曲げ半径・成形領域と非成形領域の組み合わせり方・幅方向の寄せ量・材料の機械的特性などの因子と、スタンド間距離・ロール径・サイドロールやガイドの有無などの条件因子とから決定される。逆に使用する成形機の能力の面から許容段数の上限が与えられている場合もある。ロール段数の決定は所定の製品の成形プロセスの設計時の最も大きな課題の一つであり、通常、必要最小限の段数を求める努力が払われているが、この問題は別の見方をすれば、所定の断面形状に向って1段当りの可能な成形の限界を求めることと同じである。この成形限界を求めるためには、一般に、一連のプロフィールを有するロールによってなされる成形プロセスの各段階において、材料が示す変形挙動すなわち材料内部に発生する歪や応力の分布形態やその推移を把握し、かつまたその変形挙動がパスライン・ロールクリアランス・成形品種・材料特性等上述の諸因子によって受ける影響をすべて考慮しなければならない。

筆者らは成形過程における材料の変形挙動に関しても一連の研究を進め、この問題に関して多くの新しい事実を明らかにしたが、それらの結果から判断して、従来ロール段数の決定のために採用されてきた便宜的方法、たとえば、成形断面深さの増加率すなわち平板から製品断面に至る材料の平均立上り角度を一定値以下に抑えるようにロール段数とスタンド間距離の組合せを考える、という方法等に関しては疑問の余地が多く、それらの考え方はごく限られた場合には適用可能であっても、その一般性には著しく疑問の点が多いといわざるを得ない。さらに注意すべきことは、従来、ロール段数が多い程成形プロセスや製品形状の安定化に対して好ましい影響を与えるものと考えられてきたが、このことは必ずしも真ではなく、ロール段数が不必要に多くなると1段当りの材料の変形量が少なくなり、かえって成形プロセスの不安定化を招き、製品形状が劣化する場合があるという事実である。もちろん、ロール段数を過度に少なくすると、成形中に材料に発生する付加の変形が著しく増大し、そ

のため材料の座屈や縁波・ポケットウェーブ・割れ・長手方向のそり・ねじれ等の製品の形状不良の発生原因となり、別の意味での成形プロセスの不安定化を招く。したがってロール段数については、目的とする成形内容・製品品種に応じて最適値があると考えるべきである。この問題に関しては未だ検討すべき内容が多く、またそれによって得られる成果の大きいことも期待できる。

4. 成 形 機

所定の製品を成形するための成形機的设计・製造に際しては、次の各項すなわち、モーター馬力（成形エネルギー・機械損失等を含む）の算定、成形荷重と成形トルクの評価、ロール径・ロール回転数に対応する実成形速度の推定、動力の伝達とロール回転機構の決定、圧下調整機構の決定、ロール組替方式とスタンド構造の決定、ロール軸径・ロールスペース（スタンド幅）・スタンド高さ・スタンド間距離・スタンド数等の諸元の決定、などが主たる問題としてあらわれる。これら成形機の機能・様式を決定する要因は、対象とする製品の形状・寸法・種類の他、目的とする成形速度、一品種当りの成形量、ロール組替え頻度などの使用条件であるが、ロールプロフィールまたは成形プロセスの決定が一義的になされ得ないのと同様に、これらの機能・様式の決定にも多くの自由度があるため、かえって問題が複雑となり最適化の方向を見い出すことを困難にしている面がある。

成形機を機能的な面からみると、(1)駆動方式、(2)ロール組替方式、(3)圧下方式、の3種の問題が考えられる（図3参照）。駆動方式については、全体的にみれば、全スタンド一括駆動方式と各スタンド個別駆動方式があり、個々のスタンドに関しては、上・下軸強制駆動方式と、各スタンド毎に上または下ロール軸のみを駆動し他をアイドラーロールとして用いる単軸駆動方式がある。上・下軸強制駆動方式の場合はさらにダブル型アイドルギアなどの駆動ギアをスタンドに内包している

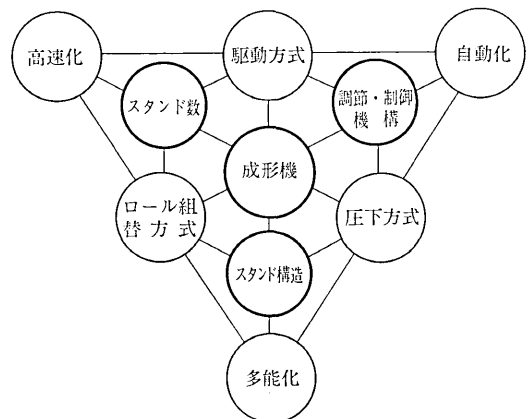


図3 成形機に関する因子と問題

方式と、全スタンドに対応するドライブハウジングを別に設け上・下ロールを別々にユニバーサル・ジョイントを介して駆動する方式とがある。

一般に、成形中に上・下ロールに作用するトルクは等しくならないのが普通であり、場合によっては一方に負のトルクが作用することも珍しくない。このため目的とする成形に最も適切な駆動方式を選択することは難しい問題であり、特に各スタンドに対する動力配分をどのように考えかつそれを実現するかという点に関しては検討の余地が多い。駆動方法が適切でない場合には、単に動力損失が増すばかりでなく、特定の駆動軸に過大な負荷がかかり強度的な面での問題をひき起したり、ロール・材料間のすべりによるロール摩耗や製品表面の損傷の原因ともなり、さらには材料の流れを阻害し成形プロセスの不安定化にもつながるので注意しなくてはならない。最近、新しい試みとして油圧を用いた定トルク駆動方式の開発も行なわれているが、適用の仕方如何により上述の種々の問題に対する有効な手段になり得るものと考えられる。

ロール組替は成形の実際作業の大きな割合を占めており、特に多品種の成形を同一成形機で行う場合には、その作業能率がラインの稼働率を大きく左右する。ロール組替方式として従来採用されているものは概略次の3方式である。すなわち、(1) スタンド頭部を開放し、ロールをロール軸・ショックごと垂直方向に抜きとり、スタンドの外で組替を行う方式、(2) スタンドの作業側ハウジング・ロールショックをはずし、ロールを軸から水平方向に抜きとり、スタンドの内部で組替を行なう方式、(3) スタンド全体を別に用意したものと入れ換える方式などである。(1)(2)の方式は最も常識的なものといえるが、成形品種や寸法により制約を受け組替に長時間を要する場合もある。(3)の方式は能率的な方法と考えられるが、設備費やスペースを要するため、ライン全体のスピードや規模との調整を図る必要がある。

実際の成形を行なう段階では、圧下調整は最も重要な問題の一つである。圧下調整の方式には大別して(1) 定荷重方式、(2) 定クリアランス方式、とがある。前者は各スタンド毎に一定の圧下荷重を加えて成形を行なう方法であるが、成形品種や各成形段階に応じて加える圧下荷重の値を適当に選ばなくてはならない。後者は、成形中のロール間隙を一定に保つ方式であるが、この場合にもロール間隙の値を適切に選択しつ保持する必要がある。圧下荷重・ロール間隙のいずれも、成形中の材料の変形挙動ひいては製品の形状・寸法に直接的な影響を与え、さらに成形限界等プロセスの安定性の問題とかかわりがある。同時にその値の選択はロールプロフィール・成形断面の形状や寸法・材料の機械的性質など種々の因子の影響を受けるため、非常に難しい問題を多く含んで

いる。従来、これらの問題に関する研究はほとんどなされておらず、これらの問題を自由に処理できる手法あるいは実際の処理機能を有する成形機も無く、もっぱら現場作業者の経験と勘に頼っているのが現状であるが、成形プロセスの自動化・製品形状制御システムの開発・導入等に対する基礎ともなる問題であるので、早急に検討する必要がある。

成形機を機構的な面からみると(1) スタンド数、(2) スタンド構造、(2) 制御方式の3点が考えられる(図3参照)。

スタンド数の問題は前節で述べたロール段数の問題と同義であるためここでは省略する。スタンド構造は上述の駆動方式・ロール組替方式・圧下方式に関する諸機能を如何に満足させるかという点と必要な強度を維持するという2点からほぼ決定される。

成形機の制御問題についてはこれまで全く検討されていないが、成形機に要求される機能が次第に高度化するとともに、この問題に対する研究・開発の必要性が高まってきている。制御の対象となるのは概略(1) 駆動システム、(2) 圧下調整システム、(3) パスライン調整システム、(4) 形状矯正システムなどである。

駆動システムに関しては、既述のごとく全消費動力の低減・各スタンドへの動力配分の適正化・上下ロール間の負荷の適合・スタンド間の負荷の適合・実成形速度の制御・などがその制御目標になる。その場合、駆動方式としては各スタンドおよび各ロール個別駆動方式を採用してあることが基本となるが、必ずしもそればかりではなく、全体のスタンドを幾つかのグループに分け、各グループ毎に別系統の駆動を行い、各グループ間の適合を図ることにより、巨視的にみたプロセスの改善を行なうという考え方もありうる。

圧下調整システムについては、製品形状の制御・各スタンドへの圧下力の適分配分・材料の流れの円滑化・初期設定の自動化などが制御目標として考えられる。これらの目標は相互に適合するものばかりでなく、相反する内容あるいは要求をも含んでいるため、その間の調整を図ることがかなり難しい問題である。圧下調整の制御を行う場合、定荷重方式に基づいて行なうのが容易であると考えられるが、定クリアランス方式であっても十分可能性はある。また、この場合も、全スタンドにつき個別に行なう方式ばかりでなく、グループ別あるいは特定のキースタンドに関してのみ制御を行う方式も、全体のプロセスの改善には有効である。

パスラインは、製品形状や各ロールにかかるトルクに大きな影響を与えるが、パスライン調整システムの最大の制御目標は製品の長手方向の形状不良、たとえば、そり・ねじれ・縁波などの防止にあるといえる。従来の成形機に関してはパスラインを有効に調整しうる機能を有

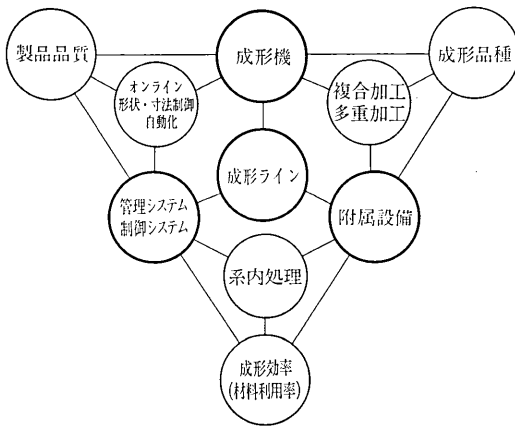


図4 成形ラインの構成要素と問題

するものはないといってもよいが、この問題は重要であり制御システムの導入により得られる効果の大きいことも期待できるので、今後積極的に検討すべき問題である。

一般に、最後の数スタンドにおける加工を矯正成形とみなして、その役割を積極的に活用することは、製品形状の改善に有効である場合が多い。そのためには、これら数スタンドに上述の圧下調整・パスライン調整等の機能を重点的に付与し、それらを制御するシステムを整備しておくことは、極めて効率的な製品形状の制御を可能にし、同時に上流側における成形に対する依存度を低め上流側スタンドの負担を軽減するので、全体的にみたプロセスの安定化をもたらす結果となる。

いずれにせよ、成形機の制御問題は今後の課題であり、技術的にも十分可能性のある問題が多く、それによって得られる成果は大きなものとなることが期待され、長期的にみればロールフォーミング加工の将来を左右する問題であるといえる。

5. 成形ライン

成形ラインは、(1)成形機本体、(2)付属設備、(3)管理・制御システムの基本要素から構成される(図4参照)。

(1)の成形機に関しては前節において述べた。(2)の付属設備として一般に用いられている主なものは、スリッター・アンコイラー・レベラー・ストレートナー・溶接機・切断機・パイラー・各種ガイドなどである。これらの設備は各々固有の機能を有し、固有の問題を内包しているが、それらについて逐一論じることは本報の目的ではない。(3)の管理・制御システムとしては、全体的ないわゆる工程管理の他に、材料あるいは製品の品質管理、材料供給システム・成形プロセス・製品処理システム等の制御、などを含む。これらの個々の問題についても検討すべき点が多いが、ここでは成形ライン全体を一

つのシステムとしてとらえ、その問題点と今後の可能性などについて簡単に述べる。

まず付属設備について考えてみる。上述の種々の設備は、従前的な成形加工を行なう上での補助的な役割を果しているにすぎないが、これをより積極的にとらえ、加工内容の質的变化をもたらすものへと発展・拡大させることは十分可能であり、またロールフォーミング加工の今後のあり方にとって極めて意義の大きい問題であるといえる。すなわち、ロールフォーミング加工による成形内容を単なる曲げ加工にとどめず、切断・接合・張り出し・絞り・等板材を対象とする他の多くの加工技術を積極的に導入し、成形内容の複合化・多重化を図ることにより、従来と質的に全く異なる加工が可能になり、成形品種の拡張や新しい製品の開発、さらには新しい加工技術の開発も考えられる。この他複列ラインによる多重成形の問題もある。すなわち、現在行なわれている成形は全て単列ラインによるものであり、そのために成形内容が制約を受けている面が少なくない。しかしながら、ラインを複列化し、成形後に個別的に得られた製品を接合して一体化し最終製品を得るという方法により、その制約を打破し成形可能範囲を拡張することは可能である。いわゆる系内処理の思想に対応するこの考え方は、全体のシステムを複雑化し、各ライン間の適合等高度の技術を要する問題であるが、成形効率の向上・加工内容の高度化などの面で期待できる点が多いといえる。

管理・制御システムには既述のような種々の問題が含まれるが、当面の最大の課題は製品形状・寸法のオンライン制御とライン全体の自動化・無人化の問題である。形状・寸法の制御方法あるいはそれを実現するシステムとしては、様々な考え方があり得るが、最も現実的な考え方は、プロセスの適当な段階に形状・寸法の修正または矯正用のスタンド・タークスヘッド等を設け、それらによる加工条件を重点的に制御する方法である。通常用いられるスタンド数(ロール段数)は相当数にのほりかつそれらの間には強い相互作用が存在するので、個々のスタンドにおいて、パスライン・圧下量等を変更しつつ形状・寸法の制御を行なおうとする方法は、問題を複雑にする割に効果の少ない場合が多い。しかし、スタンド数の制約等の理由により、そのような方法を採用場合には、各スタンドにおけるロールの果すべき役割をできるだけ単純化し、外部からの制御量と形状・寸法にあらわれる変化量との関係を明確にしておかなければならない。

さらに、この制御システムの実現には、製品の形状・寸法の検出機構の開発が必要となるが、この面に関しても未だ白紙状態であり、今後の重要な検討課題である。

ライン全体の自動化・無人化の問題は、成形機または成形プロセスの自動化、主として上述の製品形状・寸法

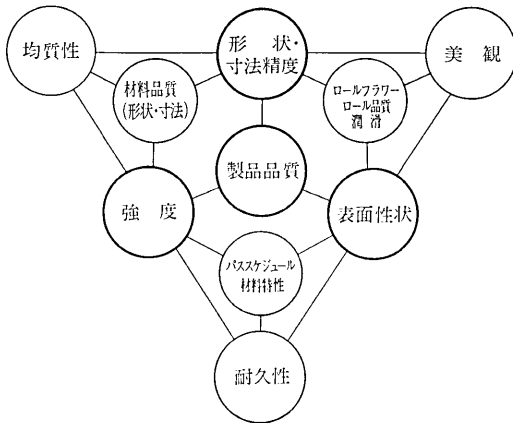


図5 製品品質の標価基準と問題

のオンライン制御の成否に依存している面が強く、材料の送入・成形後の切断・製品の処理等に関する問題はいわば副次的なものであり、技術的には十分解決できると考えられる。

6. 製品品質・製品設計

従来用いられている製品品質の概念は必ずしも一義的なものではなく、場合に応じて漠然と用いられているにすぎないが、いまこれを整理すると次のようになる。

まず、製品品質の評価は大別して次の3点からなされるといえる(図5参照)。

- 1) 形状・寸法精度
- 2) 強度
- 3) 表面性状

これらの各項目に関しては、さらに細かい点が考えられ概略次のようになる。

- (1-1) 長手方向の全体形状・寸法(真直度・そり・ねじれ・切断長さ・など)
- (1-2) 幅方向の全体形状・寸法(平坦度・製品幅・うねり・など)
- (1-3) 長手方向の局部形状・寸法(ポケットウェーブ・縁なみ・腰折れ・など)
- (1-4) 幅方向の局部形状・寸法(曲げ角・曲げ半径・縦ジワ・など)
- (2-1) 断面各部の肉べり
- (2-2) ロールによる圧痕
- (2-3) 成形による材料の局部的変質(パウシンガー効果による強度低下など)
- (3-1) 表面のあれ(ストレッチャーストレインの発生など)
- (3-2) 表面キズ
- (3-3) 表面光沢

上述の基本3項目をさらに拡張して考えると、形状・寸法と表面性状は美観の問題に関係し、強度と表面性状

は耐腐蝕性等を含む耐久性を支配する要因となる。さらに形状・寸法・強度に関しては、製品全体にわたる均質性が強く要求される。

基本3項目の各々は、製品品質を評価する一つの指標となるが、これらの全てを同時に満足することは必ずしも可能ではない。たとえば、形状・寸法が強く要求される場合には、ロールによる材料の圧下をある程度以上強める必要が生じることが多いが、このことは製品表面の保護やロール圧痕の防除に対して好ましいこととはいえない。それ故、製品品質を制御する場合には、目的とする品質の標価基準を明確にし、それに合致する成形プロセスの選択と制御を行わなければならない。

製品設計を行う場合にも同様なことがいえる。すなわち、設計の段階においては目的とする製品に要求される質的特性を十分に検討し、最も優先すべき特性を明確に認識しておく必要がある。たとえば、薄板広幅製品について大きな問題となっているポケットウェーブの発生は、断面の形状・寸法と材料の機械的特性の影響を強く受けるが、両者の組合せが不相当である場合には、成形プロセス自体としてポケットウェーブの発生を抑制することには非常に困難を伴う。厚肉断面の折り曲げ部の肉べり・材料の幅方向への伸び、縁波の発生、パウシンガー効果による強度劣化、などについても同様であり、成形プロセスの特質上不可避免的に発生が予想される問題については製品設計の段階において綿密な配慮を加え、成形プロセスに過重な負担がかからぬようにしなければならない。

したがって、所定の製品品質を達成し、維持するためには、製品設計の段階において、成形プロセスの特質、成形ラインあるいは成形機の機能・能力、制御システムの許容範囲、などとの適合問題について検討し、成形の限界に関する明確な認識を得ておかねばならない。ただしこのことは消極的な意味ではなく、高加工度化の達成やプロセスの安定化などを含む積極的な問題の追求として理解すべきである。

7. 新しい技術的課題

1. 高速化

生産能率の向上を図るために最も直接的な方法はラインスピードの高速化である。高速化を実現するうえで直面する問題は種々あるが、大別すると(1)成形加工自体に関する問題、と(2)材料の供給・製品の切断等を含む前処理・後処理に関する問題、とが考えられる。

成形自体に関しては、高速化によって発生する障害は本質的にはないといえるが、副次的問題として、通板が十分円滑になされ得るか否か、ロール摩耗が加速的に増大することはないか、というような問題が考えられる。この両者はロールの等周速半径の設計値と実際値、ロー

ル・材料間の接触状況、駆動方法に強く結びついている。実際の成形時の材料速度は、材料を噛み込んでいる全スタンドのロールが材料に与える送り力（摩擦力）の力学的釣合の上に決定されるが、この値を予め推定することは厳密に言えば不可能に近い。それ故、あるスタンドへ材料が進入してきた際に、材料断面の全体またはその一部の進入速度がロール周速を上まわり、材料の長手方向に圧縮力が加わり、材料の進入が阻害され、座屈やまくれ込みあるいはロール破損を誘起する可能性がある。成形が高速化すると共に、このような現象が衝撃的に起り、発生するトラブルも重大化するおそれがあるので、通板の円滑さには特に留意する必要がある。また、ロール・材料間の接触圧力分布と実等周速半径のロールプロフィール上の位置とが適合せず、高接触圧力の分布域が実等周速径の外または内に入ると、高接触圧力発生域におけるロール・材料間のすべり速度が大となるため、ロール摩耗は著しく増大することが考えられ、この点に関しても十分な検討が必要となる。

ラインスピードの高速化については、一般に、前処理・後処理工程における問題の方が本質的である場合が多い。特に、閉断面の成形プロセスで溶接工程が入る場合には溶接速度が、また製品を一定長さに切断する場合には切断速度が、大きな制約条件となる。このうち、切断に関しては切断方法に関連する問題と長さの検出に関連する問題がある。切断方法としては、成形速度がある程度以上になるとダイセット方式が多く採用されているが、高速化に伴って工具強度を高める一方、作動質量の低減を要する、という相反する条件が課せられるため、技術上高度な問題が多い。さらに、閉断面を有する製品の切断方法としては、極細の薄肉管の場合を除き、ノコ刃を用いる以外に現在のところ有効な手段がなく、高速化に対する大きな障害となっている。製品の切断長さの検出は、実成形速度の検出値を積分する方法とストッパーを用いる方法とが考えられる。しかしながら実成形速度については成形中かなりの変動量が含まれると考えられ、それらを精度よく検出することは相当困難である。また、ストッパーとしては、いわゆるタイロッド方式ばかりでなく電氣的・光学的方法も考えられるので、この面についても検討の余地がある。

高速化に際しては、この他、コイルまたは切板の送入・製品のとり出し等の問題があるが、これらは切断・溶接の問題に比較すれば二次的なものであるといえる。

2. 多目的化（多能化）

ラインの稼働率を規定する大きな要因にロール組替えと圧下調整がある。現在、成形断面の形状・寸法が異なる場合、それぞれ対応する多数のロールを組替えて成形を行なっている。しかしながら筆者らの一連の研究により、成形中に材料に対して有効に作用しているのはロー

ルの限られた部分にすぎないことが判明してきた。このことは、その限られた部分を圧下してやることにより所定の断面の成形が十分可能であること、その圧下の方法は必ずしも特定のプロフィールをもつロールによるものでなくともよいことを意味している。そこで、材料の任意の限られた領域に必要なかつ十分な圧下力を付与することが可能な汎用性を有するロールおよびその位置を調整する装置を具備したスタンド、さらにそれらより構成される成形機によれば、異種・異寸法の製品を実質的なロール組替えなしに成形することが可能になる。これは、ロールおよび成形機が多目的化または多能化といえるものであり、事実、既に一部においてこの面での技術開発が進められており、その成果が期待されている。

3. その他

この他、ロール設計の自動化、新しいプロセスの開発、他の加工技術の導入による成形内容の複合化、設計・制御システムの開発、等に関する試みもあり、論ずべき多くの問題もあるが、それらについては別の機会にゆずることとする。

8. 結 言

本報においては、塑性加工の分野で大きな役割を果たしているロールフォーミング加工法について、その全体像と問題の広がり、相互の関連性などを総括的に述べ、その学問的・技術的側面と現時点における展望を最適化問題と関連させつつ論じた。しかしながら論ずべき問題が非常に多いため、副次的な多くの問題を除外したにもかかわらず、議論が表面的なものに終わった点も多い。

従来、ロールフォーミング加工をこのような見地から検討した例はなく、本報に述べた事項の大部分は筆者の考えが中心となっているため、検討すべき余地はまだ多いと思われる。さらに、この問題に関しては、それを扱う方法論が確立されていないのが現状であるため、問題の把握・分析の手法などについても種々の異論がある得るものと考えられる。したがって、今後この方面の研究の一層の発展を期待するとともに、それによってもたらされる技術的改善の余地は非常に大きいことと考える。

(1973年8月2日受理)

参 考 文 献

- 1) R. T. Angel: Machine Design. Dec. 1956, p. 106.
- 2) E. Griffin: J. of The Institute of Metal vol. 84, 1955-56, p. 181.
- 3) V. I. Davydov, Yu. K. Puzyrevsky: Stal' Rolling and Tube Manufacture Supplement. 1959, p. 95.
- 4) Yu. A. Mednikov: Stal' April 1963, p. 300.
- 5) G. Sacks: Trans. ASME. 37, 1946, 449, 1951, 494.
- 6) D. A. Johnston: Tool Engineers Handbook. 1949, 989.
- 7) C. J. Nocar: Steel Partition Gain Acceptance. Sept. 1950.
- 8) E. J. Vanderploeg: Roll-Forming. Simple Method

- for Designing Rolls. Oct. 1953.
- 9) E. J. Vandrploug: Iron and Steel Engineer. Oct. 1955, p. 76.
 - 10) E. J. Vauderploug: Roll-Forming. Machine Design Sept. 1963, p. 114.
 - 11) 加藤: 冷間成形圧延法 (I), (II).
 - 12) 馬場: 友金属, Vol. 15, No. 2, Apr. 1963, p. 19.
 - 13) 原田: 鉄と鋼, 1963, 第 11 号, p. 72.
 - 14) 益田以下 5 名: J. of the J. S. M. E. Vol. 67, No. 542. p. 58.
 - 15) 益田以下 5 名: 塑性と加工, Vol. 5, No. 43, 1964-8. p. 519.
 - 16) 益田以下 5 名: 塑性と加工, Vol. 6, No. 54, 1965-7.
 - 17) 橋本, 紀田: プレス技術, 第 2 卷, 第 7 号, p. 81.
 - 18) 渡辺: プレス技術, 第 2 卷, 第 7 号, p. 5.
 - 19) 加藤: プレス技術, 第 2 卷, 第 7 号, p. 29.
 - 20) 寺井: プレス技術, 第 2 卷, 第 7 号, p. 13.
 - 21) 出水: プレス技術, 第 2 卷, 第 7 号, p. 43.
 - 22) 鈴木, 木内ほか: 19 回塑加連講論 (1968) 437.
 - 23) 鈴木, 木内ほか: 19 回塑加連講論 (1968) 441.
 - 24) 鈴木, 木内ほか: 19 回塑加連講論 (1968) 445.
 - 25) 鈴木, 木内ほか: 19 回塑加連講論 (1968) 449.
 - 26) 鈴木, 木内ほか: 18 回塑加連講論 (1967) 313.
 - 27) D. I. Starchenko & M. I. Chelovan: *STAL in English*, 2 (1968) 130.
 - 28) I. S. Trishevskii & V. V. Kalepanda et al.: *STAL in English*, 1 (1968) 39.
 - 29) I. S. Trishevskii & V. V. Kalepanda et al.: *STAL in English*, 8 (1968) 661.
 - 30) I. S. Trishevskii & V. V. Kalepanda et al.: *STAL in English*, 8 (1968) 664.
 - 31) 木内: 18 回塑加連講論 (1967) 305.
 - 32) 木内: 18 回塑加連講論 (1967) 309.
 - 33) 木内: 19 回塑加連講論 (1968) 433.
 - 34) 山川, 山下, 松島: 機械学会講演論文集, No. 205(1969-4) 280.
 - 35) 小門, 小野田, 石倉, 杉田, 広野, 井上: 鉄鋼協会第78回講演概要集 (鉄と鋼), 55-11 (1969-9).
 - 36) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 20 回塑加連講論 (1969-11) 289.
 - 37) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 20 回塑加連講論 (1969-11) 293.
 - 38) 鈴木, 木内, 中島, 雪竹: 20 回塑加連講論 (1969-11) 297.
 - 39) 鈴木, 木内, 木村: 20 回塑加連講論 (1969-11) 301.
 - 40) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀: 塑性と加工, 10-97 (1969-2) 102.
 - 41) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀, 雪竹, 柴田: 塑性と加工, 10-98 (1969-3) 157.
 - 42) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀: 塑性と加工, 10-102(1969-7) 494.
 - 43) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀: 塑性と加工, 10-102(1969-7) 502.
 - 44) 木内: 塑性と加工, 10-104 (1969-9) 635.
 - 45) 木内: 塑性と加工, 10-104 (1969-9) 646.
 - 46) 鈴木, 木内, 木村: 20 回塑加連講論 (1969-11) 281.
 - 47) 木内: 20 回塑加連講論 (1969-11) 285.
 - 48) 塚本, 中山: プレス技術, 7-12 (1969) 44.
 - 49) V. M. Shvarts, N. G. Lenvitskii, S. P. Belousov & E. P. Korobkin: *Stal in English* (1969-6) 580.
 - 50) A. Smart: *Sheet Metal Industries* (June, 1968) 415.
 - 51) F. C. Porter & G. K. Walden: *Sheet Metal Industries* (August, 1969) 415.
 - 52) 鈴木, 木内, 中島, 赤堀: 日本機械学会誌, 73-614 (1970), 355.
 - 53) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 塑性と加工, 11-110(1970), 315.
 - 54) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 塑性と加工, 11-110(1970), 202.
 - 55) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 昭 45 春塑加講論 (1970), 13.
 - 56) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 塑性と加工, 11-119(1970), 913.
 - 57) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 昭 45 春塑加講論 (1970) 19.
 - 58) 鈴木, 木内, 中島, 高田: 21 回塑加連講論 (1970), 75.
 - 59) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 21 回塑加連講論 (1970), 79.
 - 60) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 21 回塑加連講論 (1970), 83.
 - 61) 加藤, 斎藤, 藤田: 21 回塑加連講論 (1970), 87.
 - 62) 鈴木, 木内, 木村: 昭 45 春塑加講論 (1970), 1.
 - 63) 小門, 小野田: 日本鉄鋼協会第 79 回講演概要集 (鉄と鋼), 56-4 (1970), 202.
 - 64) 小門, 小野田: 日本鉄鋼協会第 79 回講演概要集 (鉄と鋼), 56-4 (1970), 204.
 - 65) 木内: 昭 45 春塑加講論 (1970), 7.
 - 66) 鈴木, 木内, 木村: 塑性と加工, 11-112 (1970), 343.
 - 67) Trishevskii, I. S., Klepanda, V. V. & Dakhnovskii, E. S. *Stal Engl.*, March (1970), 228.
 - 68) Trishevskii, I. S., Gritsuk, N. F., et al.: *Stal Engl.*, July (1970), 543.
 - 69) 深田, 秋田, 鈴木: 日本機械学会誌, 73-616 (1970), 632.
 - 70) 木内: 日本機械学会誌, 74-631 (1971), 942.
 - 71) 木内: 塑性と加工, 12-120 (1971), 20.
 - 72) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 同上, 12-130(1971), 830.
 - 73) 鈴木, 木内, 中島, 高田: 昭 46 春塑加講論, (1971), 145.
 - 74) 鈴木, 木内, 高田: 22 回塑加連講論, (1971), 235.
 - 75) 鈴木, 木内, 木村: 塑性と加工, 12-123 (1971), 301.
 - 76) 鈴木, 木内, 新谷: 昭 46 春塑加講論, (1971), 141.
 - 77) 小野田, 小門, 青木: 鉄と鋼, 57-11 (1971), 257.
 - 78) Tilik, W. T., Hesenzuk, F. A., et al.: *Stal in English*, September (1970), 708.
 - 79) 山川, 山下, 佐藤: 昭 46 春塑加講論, (1971), 137.
 - 80) 山川, 山下, 泉, 佐藤: 22回塑加連講論, (1971), 231.
 - 81) 加藤: プレス技術, 9-11 (1971), 229.
 - 82) Thompson, F. E.: *Sheet Metal Indust.*, 48-11(1971), 835.
 - 83) Stutzke, F.: 同上, 48-10 (1971), 746.
 - 84) 川田, 庭野: プレス技術, 8-9 (1971), 101.
 - 85) 越智, 西郷: 同上, 9-3 (1971), 23.
 - 86) 斎藤, 藤田, 加藤: 塑性と加工, 13-143 (1972), 907.
 - 87) 鈴木, 木内, 新谷: 昭 47 春塑加講論, (1972), 237.
 - 88) 小門, 小野田: 塑性と加工, 13-132 (1972), 21.
 - 89) 中島, 水谷, 菊間, 松本: 23回塑加連講論, (1972), 247.
 - 90) 小門, 小野田: 塑性と加工, 13-142 (1972), 851.
 - 91) 鈴木, 木内, 中島, 高田: 塑性と加工, 13-133 (1972), 83.
 - 92) 神田: プレス技術, 10-4 (1972), 51.
 - 93) 小野田, 寺井: 水曜会誌, 17-8 (1972), 373.
 - 94) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 塑性と加工, 13-138(1972), 508.
 - 95) 鈴木, 木内, 新谷, 三浦: 23回塑加連講論, (1972), 248.
 - 96) 木内: 昭 47 春塑加講論, (1972), 249.
 - 97) 古川, 高橋: 23 回塑加連講論, (1972), 250.