

特集 3

ロールフォーミング加工における製品形状の特性と制御

Shape Characteristic and Shape Control of Product in 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強割を果しつつあり、その製品は、土木・建築・船舶・航空機・自動車・住宅・電気製品など多くの分野において用いられている。板材の成形法として非常に高度な問題を数多く含んでいるが、それらの多くは製品の形状・寸法の精度をより高める問題と関連している。ここでは、各種製品の形状特性と不良例、あるいはそれらに対応する加工プロセスなどに関して、現状と改善の方向を検討した結果の概略を示す。

1. はじめに

ロールフォーミング加工は、タンデムに並んだ成形ロールの間に、フープ材・コイル材・切板等種々の形態を有する板材を通し、それらに漸進的かつ連続的に幅方向の曲げ加工を施し、所要断面を有し長手方向に一様な管材・型材・プレート類・サッシ類などを成形する塑性加工

工法の一つである。

その発展の経過をたどってみると、まず材料工業としてのロールフォーミング加工は、当初、建築構造用部材の加工法として開発され、柱材用の各種丸パイプ・角パイプあるいは軽量形鋼等の成形によって代表されてきたが、その後量的ならびに質的發展を遂げ、現在では 1,200 mm 幅の板からデッキプレート・フロアパネル・ルーフデッキ・キーストンプレート等の屋根材・床材・壁材などを直接成形するまでに至り、建築構造物の面を構成する材料にまで広く進出している。これらの精度の高い薄板から成形される品質の良い建築材料の普及が、現在、高層建築の施工期間短縮に貢献し、あるいは比較的低価格の耐火建築・耐震建築等の実現を促進している。このような意味から、ロールフォーミング加工は鉄鋼の建築材への進出の基本的役割を果しているといえる。

さらに、土木建設・プラント工業等へのロールフォーミング製品の進出も著しく、シートパイルその他の構造用部材・ガードルール、あるいはガス・石油等の輸送用大口径パイプなどの成形を通して、これらの分野に品質の秀れた多くの部材を提供している。

一方、部品加工工業としてのロールフォーミング加工は、船舶・航空機・自動車・家庭電化製品・プレハブ住宅等の総合組立工業における有力な部品加工工程を形成している。すなわち、船舶・航空機・自動車用の薄板構造部材・床壁面材・複雑なサッシ類あるいはラジエーターチューブ・マフラー用被覆管などをはじめとする多種多様な部品、さらに新建材と呼ばれる一連の住宅用板製品・型材などが現在多量に生産されている (図 1 参照)。

このように、ロールフォーミング加工により

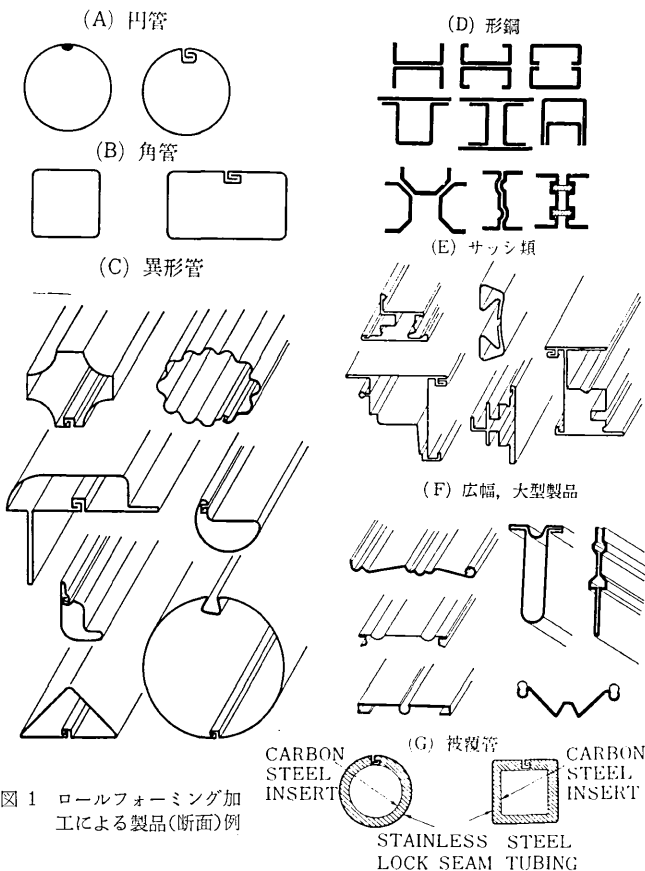


図 1 ロールフォーミング加工による製品(断面)例

\* 東京大学生産技術研究所 第 2 部

成形される品の用途は極めて広い範囲におよんでおり、その利用度は現在ますます増大する傾向にある。しかし、この量的ならびに質的拡大とともに、製品に対する要求は次第にきびしくなり、質的により秀れた製品が求められつつある。特に寸法精度の高い製品に対する要求が強く、この面における技術上の改善が急がれている。しかるに、このロールフォーミング加工は、塑性加工法として比較的新しく、技術的な基盤の形成が著しく遅れているのが現状である。

そこで本報では、ロールフォーミング加工における製品形状の決定のメカニズムと、それに影響を与える種々の因子について検討し、合わせて製品形状を制御する手法と問題点等と考察してみる。

## 2. 製品の種類・寸法と形状特性

現在、実際生産の場で成形されている製品の品種あるいは断面形状は、上述のようにきわめて多様であるが、それらを寸法の面から分類し、形状特性の概略を列挙すると次のようになる。

(1) 極薄小物断面：板厚が0.8 mm 以下0.1 mm 程度の素材を用いて成形される製品であり、自動車用ラジエーターチューブなどの極細管、特殊チャンネル材やサッシ類、あるいはブラインド用素片などに代表される。これらの場合、長手方向には真直で断面形状としてはきわめて精度の高い製品が要求される場合が多い。しかし素材の(板幅/板厚)比が比較的大きく、また板厚の絶対値が小であることから、材料の変形挙動が不安定になりがちであり、成形中に局部的な座屈などが生じ易い。さらに弾性回復量の割合も大きいので、所定の断面を正確に成形し、長手方向に真直な製品を得ることが非常に困難である場合が多い。特に管状製品の成形では、通常、継ぎ目の部分をかしめるかまたは溶接する必要が生じるが、かしめる場合にはその部分細部の寸法精度が、溶接する場合には突き合わせ部の形状が問題となる。またブラインド用素片などのように非常に浅い断面を有する製品では、弾性回復量が相対的に大きいので、断面形状が不安定となり、所定の寸法を得ることが非常に難しい(図2参照)。

(2) 広幅断面：デッキプレートその他の各種のプレート類やさまざまな名称で呼ばれている屋根材・床壁面材・非常に複雑なサッシ類などがこの部類に含まれる。素材の板厚は通常2.0 mm 以下、板幅は最大1,200 mm 程度である。この種の断面は、曲げ加工を施す領域の数が多いため、成形プロセスの設計が難しく、コーナー部の曲げ半径・各スタンドへの成形量配分・幅寄せ量の配分・ロールクリアランスなどに特別な配慮が必要である。製品形状としては、局部的な寸法とは別に、製品の外形寸法に対する精度、特に製品幅に対する要求がきびしい

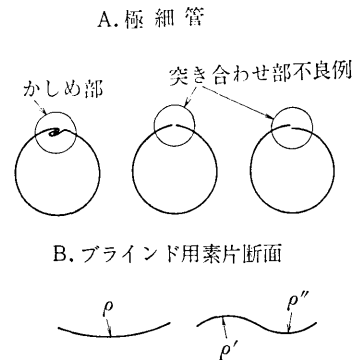


図2 極薄小物断面の例

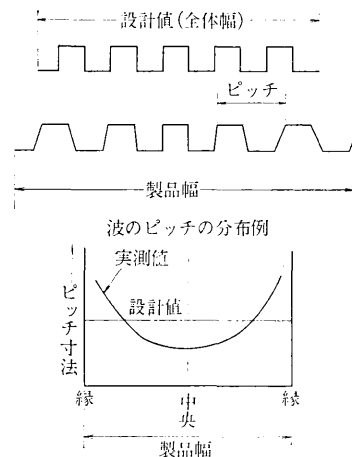


図3 広幅断面形状の不良例

場合が多いが、広幅の素材の数多くの領域に曲げ加工を施した上に仕上りの外寸法を精度よく成形することは、かなり難しい問題である。図3に示すような同一寸法の丸波または角波を数枚以上有する断面を成形する場合でも、個々の波(曲げ領域)は異なる変形条件のもとで成形を受けるため、これらの波の形状やピッチをそろえることは難しい問題であるが、このような意味からも製品幅の精度を上げるためには高度の技術を要する。

またこれらの断面については、成形中に割れ、縁波・ポケットウェーブなどが発生する場合が多く、これらは製品形状を著しく損うばかりでなく、成形プロセスを不安定化し、素材のまくれこみやロール破損の原因ともなるため、これらの問題についての十分な検討が必要である。

さらに素材として切板を用いる場合には、先端と後端の成形時における拘束条件が中間部のそれと異なり、いわゆる端末効果がでるため、製品の全体形状が図4の如くなる傾向がある。また素材の縁部と中央部との成形条件の相違から、縁部または中央部にのみそりが発生する場合もある(図5参照)。

したがって、これら広幅断面製品に関しては所定の断

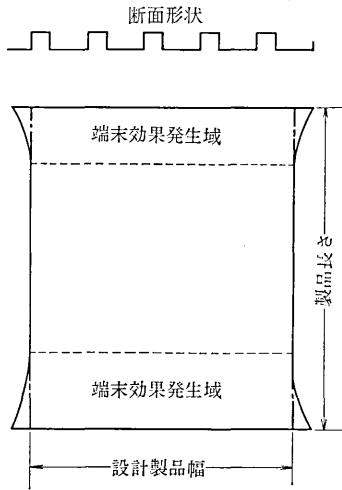


図 4 広幅製品の全体形状不良例

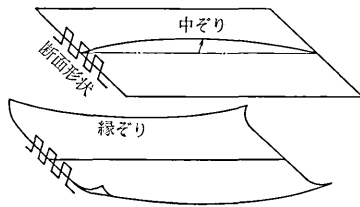


図 5 広幅製品の長手方向形状不良例

面寸法を有し、長手方向に一樣かつ平坦な製品を得ることは、技術的にかなり高度な問題であり、今後検討すべき多くの問題が残されている。

(3) 軽量形鋼断面：素材板厚 0.8~5.0 mm 程度、板幅は大略 400 mm 以下で、現在最も大量に生産されている品種である。断面の形状は C 形鋼をはじめとして L 形鋼、U 形鋼、ハット形鋼などきわめて多種におよんでいる。製品形状としては一般に長手方向の真直性かつ所定の外寸法が要求される。この品種は断面形状そのものは比較的単純であるが、(板幅/板厚)比が 100 以下となる場合がほとんどであるため、材料内部の歪分布の形態が幅方向にみて単純化し、そのためにかえって長手方向のそりや振れが発生し易い傾向がある。また角曲げを行なう場合には、曲げ部を鋭く成形することが難しく、製品の外観が悪化し易いこと、あるいはまた曲げ部の肉べりが発生し、製品の強度が低下し易いことなどの問題がある。

さらにこの種の断面では、成形後の製品を所定の長さで切断した場合に、切口の断面形状が著しく変化し、許容差をはるかに越える場合がある。この問題かなり重要であり、現場的に種々の方策が講じられてはいるが、その原因の解明はまったくなされておらず、重要な問題として今後に残されている (図 6 参照)。

(4) 大型断面：素材板厚 4 mm 以上、板幅 400 mm 以上、寸法を有する断面を概略大型断面と呼び、大型の

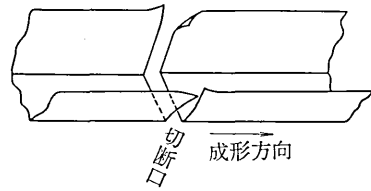


図 6 切断口の変形例

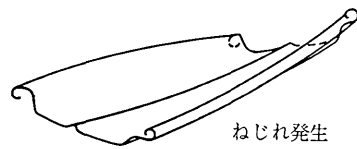
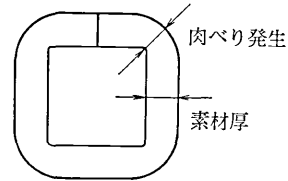


図 7 厚肉・大型断面 (製品) の形状不良例

材やシートパイルなど、土木建築用部材として用いられているものが多い。この種の製品の場合には成形荷重が相当大きくなるため、スタンドの剛性やロールの強度について十分配慮しておかないと、所定の断面を成形することが困難となる。また左右非対称な断面を有する品が比較的多いため、長手方向の真直性を確保することも難しい問題となる。さらに板厚が大きいいため曲げ部の肉べりなどの問題が生じる (図 7 参照)。

(5) 各種管断面：寸法的には軽量形鋼断面から大型断面にまたがっているが、他の多くの断面が開断面であるのに対し、溶接工程を経て閉断面となることから、管断面はそれだけを他と分けて考えることができる。断面の形状は大別して円管とそれ以外の異形管とに分けられる。円管の場合には真円度が、異形管の場合には所定断面形状がそれぞれ問題となる。長手方向には真直性が要求される場合が多いが、この種の製品ではねじれが発生し易い。またこの場合にも、成形後切断すると切口の形状が著しく変化する場合があり、このような変形は予め予測することが困難であるため、製品形状を整えるうえで大きな障害となる。

異形管を成形する場合には、最初から所定の形状を目指して成形する場合と、一度円管を成形した後にサイジングロールその他を用いて断面形状を修正していく場合とがある。前者の場合にはそれ自体がロール成形のプロセスとなっているが、後者の円管から異形管へ再成形する工程は、いわゆるロール成形とは異質の問題を含んでおり、製品形状と成形プロセスとの関係については興味深い問題が多いが、いまだまったく手つかずのまま放置されている (図 8, 9 参照)。

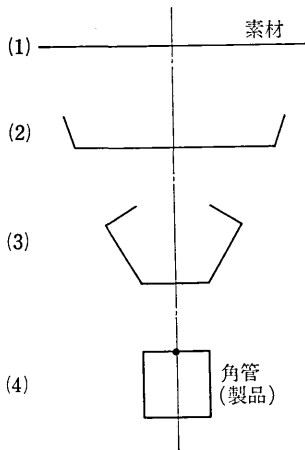


図 8 異形管の成形プロセス (1)

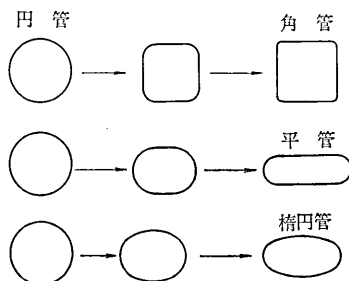


図 9 異形管の成形プロセス (2)

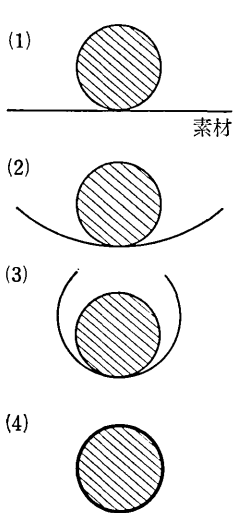


図 10 被覆管の成形プロセス (例)

(6) 被覆断面: これは以上述べた製品とは基本的に異なるもので、自動車用マフラーチューブなどにみられる特殊な製品である。すなわち二枚以上の板を重ね合わせて管状断面を成形するか、または棒・条の外部に板をまきつけ成形して得られる製品である。この種のものでは機械的特性の異なる材料の同時成形、あるいは弾性体に板材を塑性変形させつつ密着させるというような成形を行わなくてはならないため、製品形状を整えることが上記の品種以上に難しく、技術的にはまったく

未解決な分野である (図 10 参照)。

以上述べたように、ロールフォーミング加工により成形される各種の製品の形状に関してはさまざまな問題があるが、一般に製品形状にあらわれる不良性の問題を大別すると次のように整理できる。

(1) 長手方向の全体的形状不良: 製品断面は所定の寸法通りに成形されても、長手方向にそりや捩れが発生

することがある。これらの形状不良は、成形中に材料内部に発生する長手方向・幅方向の膜歪の、製品断面全体にわたる分布の形態や推移挙動に関係がある。

(2) 長手方向の局部的形状不良: これは製品の一部分に発生するそり、あるいは縁波・ポケットウェーブ、さらに広幅製品などにみられる局部的なまくれ、ふくらみなどに相当するもので、成形中に材料内部に発生する長手方向膜歪の局部的な挙動に関係がある。

(3) 断面の全体的形状不良: 断面の形状自体が所定の寸法通りに成形されていない場合であり、円弧形断面の曲率半径や角形断面の曲げ角が所定の値から外れている場合などに相当する。このような形状不良はそのまま製品の寸法精度低下をまねくので、製品の品質の評価の面で重要な問題となる。これらは、ロールプロファイルあるいはロールフラワー・ロールクリアランス・パスライン等の成形条件によってきわめて複雑な挙動を示す付加的歪成分が、断面成形のための幅方向曲げ変形に与える影響の形態や度合によって主に左右される問題である、と考えられる。

(4) 断面の局部的形状不良: 曲げ部の肉べりや破断、局部的な腰折れあるいはしわ、および円管の成形の場合などにみられる縁部の極端な形状不良などが代表的な例である。これらの中にはいわゆる板材の成形の問題とは異質であると考えられるものもあるが、全体的にみた場合、ロールフォーミング加工としては直面せざるをえない問題といえる。

### 3. 製品形状に影響を与える主要因子

既述のように、ロールフォーミング加工本来の目的は、板材に幅方向の曲げ加工を施して、所定の断面形状を有しかつ長手方向に一様な製品を成形することにある。このように表現すると、ごく単純な加工法であるかの如く思われるが、板材の加工法としてその内容に立ち入って見た場合、最も複雑な部類に入るといえる。例えば、成形中の材料を全体的にみると、第1スタンド入側では平板状態にあるにもかかわらず、最終スタンド出側では複雑な断面を有する製品となっており、その間で材料は多数の成形ロールによってかみこまれ、きわめて複雑な曲面を呈している (図 11 参照)。この曲面の形状のいかんがそのまま材料各部の変形径路、すなわち、歪状態・応力状態の推移、と対応しており、その変形径路を経た結果がそのまま製品の形状や品質となって現われる。さらにこの複雑な三次元的な曲面の形状は、多くの成形条件因子の影響を受け、きわめて多様な変化を示し、その一般的特性を把握することは容易ではない。あるいはまた、材料の変形に対する境界条件・拘束条件となるロール・材料間の接触状態が外部から規定できる性格のものではないこと、変形が弾性域・塑性域の両方にまた

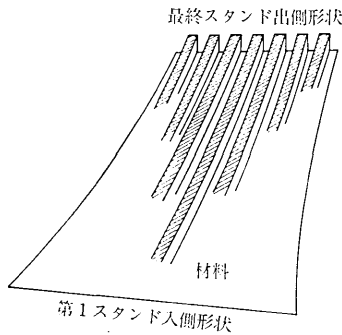


図 11 成型中の材料の変形曲面形状 (例)

がり、かついわゆる膜理論では本質的に処理できない性質のものであることなどが、問題を一層複雑にしている。

製品形状は材料のこのような変形の結果として現われるものであるから、それが決定されるメカニズムは非常に複雑であり、その内容の全体的解明は困難である。そこでここでは、成形条件因子のうち製品形状に大きな影響を与えると考えられるものをとりだし、その影響の特質とメカニズムの概略について考察する。

#### (1) 所要断面形状

ロールフォーミング加工で成形される製品の種類は多種多様であるから、それらの中には比較的容易に成形され得るものと、技術的に非常に困難さを伴うものがある。まず断面の複雑なサッシ類・パネル類・プレート類あるいはシートパイルなどは、円管やC形鋼をはじめとする軽量形鋼あるいはガードレールなど比較的単純な断面を有する製品に比較して、所定の寸法精度を有する製品を成形することが困難である場合が多い。ここで断面の複雑さという概念ははなはだあいまいであるが、ロールによって積極的に曲げようとする領域の数・曲げの方向が逆転する回数・曲げ半径が変化する回数と変化の程度・ロールに対する死角の数などの多いもの程断面が複雑であるといえよう。もちろん成形の難易はあくまで相対的なものであり、円管やC形鋼などの成形に関しても、それぞれ固有の問題があり、それらを解決するうえには技術的に非常に高度なものを要することはすでに指摘したとおりである。

成形すべき断面が複雑になるにしたがって、必要とするロール段数(スタンド数)は必然的に増加するが、それに伴って断面のどの部分からどういう順序で成形するかといういわゆる成形順序の問題も複雑化し、材料の各部分が無理なくめらかに変形を受ける成形プロセスを見出すことが、実際問題として極めて困難となる。そのため、このような場合には局部的な変形の不安定現象、すなわち座屈ともいふべき緑波やポケットウェーブあるいはシワなどの発生をまねく危険が多く、これらの局部的な形状不良を解消するため、さまざまな苦心が払われているのが現状である(図12参照)。この他断面形

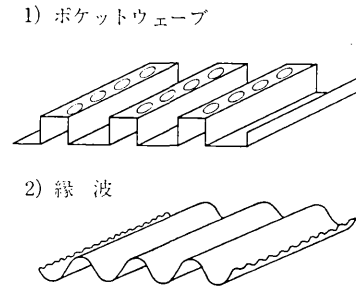


図 12 局部的形状不良例

状に関連する問題としては、対称性の問題がある。一般に断面が左右非対称なものは、対称なものに比較して形状不良を起し易い。これは材料内部に発生する歪の量が一方に偏るために、成形プロセスが力学的に不安定となり、不必要な変形までも誘起し易いためと考えられる。このため製品の断面自体が目的通りに成形されにくいばかりでなく、長手方向の形状不良、特にねじれを発生しやすい。

#### (2) 断面および素材の寸法

成形すべき断面の形状がどのようなものであるかということの他に、断面の寸法およびそれに対応する素材の寸法が、成形の難易を支配する重要な因子となる。円管の成形を例にとって考えてみると、口径/板厚= $D/t$ が一定であっても、口径が極端に小または非常に大の場合は、その中間の口径を有する管の場合に比して成形上種々のトラブルが起こり易い。このように断面の寸法により成形の難易が異なるのは、成形中の材料の変形挙動が相似則を満足するとは限らないこと、材料の変形は一般にロール直前で急激に起こること、材料の降伏点歪の値は材料固有のものであること、板の曲げ剛性は板厚の3乗に比例すること、実際生産の場合においては断面寸法にのみ合わせてスタンド間隔やロール径を十分な範囲にわたって変えることが必ずしも許されないこと、などによるものと考えられる。一般に、口径の小さい管の場合には、緑部を所定の曲げ曲率まで十分に曲げることが難しく、口径の大きな管の場合には、成形断面が深く緑部の立上り量が大きいこと、材料内部に発生する膜歪の絶対値が大きくなり、局部的な座屈が発生し易く、特に緑部すなわち溶接結合部の形状が著しく悪化するという問題がしばしば起こる(図13参照)。

一方、断面の形状・寸法が一定であっても、板厚 $t$ が極端に大または小の場合にも、成形上さまざまな問題が発生する。板厚が大の場合、所定の曲げ部を十分に曲げることが困難であり、曲げ部の塑性変形域が幅方向に向って不必要に拡大して形状を悪化させたり、曲げ部の肉べりが大きくなり製品強度の面で問題になったりする。板厚が小の場合には、材料の剛性が不十分のため、成形中にいたずらに座屈やシワあるいは腰折れなどの発

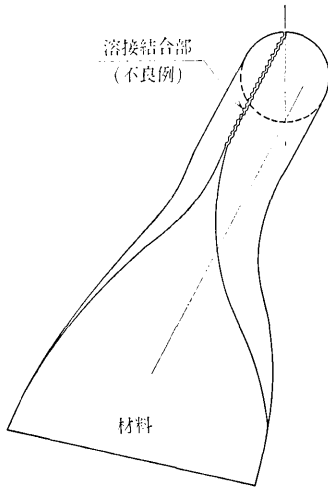


図 13 円管成形における溶接結合部の形状不良

生をまねき易く、成形プロセスの安定化のために、成形ロールの形状や寸法精度・成形機自体の精度や調整方法などの面で特別の配慮が要求される。

さらに別の問題として、成形中に幅方向の曲げ変形に伴って材料が幅方向に伸びる現象がある。この傾向は一般に板厚が大なる程、幅方向の曲げ変形量が大きい程、顕著となる。このため多くの場合、製品断面の展開幅に比して素材幅を小さくしておく必要が生じるが、この伸び量を正確に予測することは難しく、過大または過小評価した場合には、その分だけ製品の寸法精度が低下する。そればかりでなく素材幅が過大である場合には、ロール・材料間の適合が破れ、座屈やシワあるいはロール破損などをまねく危険がある。

(3) ロール形状 (ロールフラワー)

製品形状を支配する最も重要な因子は、何といっても直接材料を噛み込み曲げ加工を施す成形ロールである。従来このロール形状の設計は、まったく経験的手法に基づいて行なわれてきた。その方法とは、所定の製品断面の形状を針金や帯板を用いてつくり、この断面を漸次ほぐして直線にまでもっていく過程を幾つかの段階に分けて成形機の能力・スタンド数・スタンド間隔・パスラインの許容変化量などの制約条件のもとで、経験を基にして検討を加え、各スタンドにおけるロール形状の概略を定め、それらを実際のロールにうつしとる。次にこれらのロールを用いて実際の成形を行ない、その過程で試行錯誤を繰り返しつつ次第にロール形状を修正し、所定の製品形状が得られるまでこれを続けるという方法である。

この方法は、ロールにかみ込まれた材料がロール形状に適合した変形を受ける、という考えを前提としている。しかし、最近の研究により、実際にはロール間隙における材料の変形形状はロール形状とは必ずしも一致しないという事実が次第に明らかになってきた。例えば、円

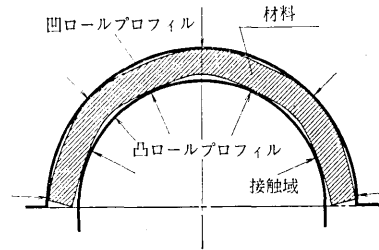


図 14 ロール間隙における材料の変形形状

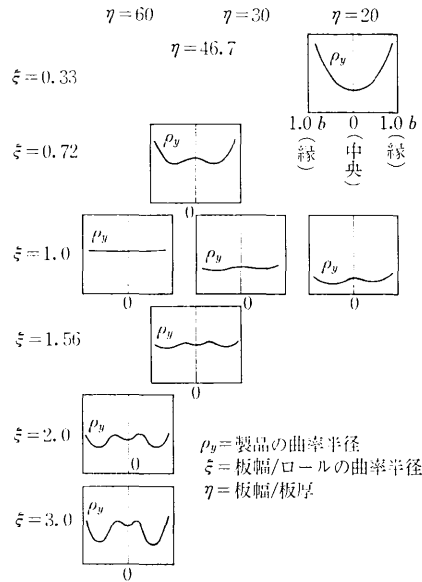


図 15 円弧形製品断面の曲率半径の幅方向分布 (例)

弧形プロフィールを有する凹・凸両ロール間に噛み込まれた材料は、均一な円弧形には曲らず、部分的に強く曲げられた領域を含む屈折状態となる傾向が強い (図 14 参照)。これは、成形時のロール間隙を厳密な意味で板厚に一致させることができないということと関係があるが、このため、成形後の製品断面の曲率半径は幅方向に均一とはならず、複雑な分布形態を示し、さらにその分布形態は他の成形条件因子により影響を受ける (図 15 参照) のが普通である。

一般に、ロール形状に関する問題は極めて多様であり、それらを統一的に把握することは容易ではない。そこでそれらのうちの主要なものをいくつか検討してみる。

まず、各スタンドのロール形状またはそれらのシーケンスとしてのロールフラワーは、成形中の材料の変形挙動、歪径路あるいは材料内部の応力状態とその推移を支配する最も重要な因子であるから、それらの良否、適・不適はそのまま製品形状・成形限界・成形プロセスの安定性などに効いてくる。さらにまた所定の形状および寸法を有する製品を成形可能なプロセスあるいはロールフラワーは、一般に唯一的に定まるものではなく、無数にあり得るので、問題は如何にしてその中から最適なもの

を選び出すかという点にある。ただしここでいう最適という概念の評価基準は、必ずしも固定されたものである必要はなく、製品の残留応力をできるだけ緩和すること、スタンド数をできるだけ少なくすること、材料各部の変形をできるだけなめらかにすること、消費動力を最小にすること、等々の基準が考えられる。しかしながらこの最適性問題はきわめて高度かつ複雑な内容を有しているため、実際の場合にはより詳細な検討が必要である。通常、所定の製品が  $n$  スタンドで成形可能であれば、 $(n+1)$  スタンド以上でも成形可能である。このようにスタンド数（ロール段数）が増加するにしたがって、材料各部の変形は外観上なめらかになり、局部的な不安定現象など、種々のトラブルが現われにくくなるのは当然である。しかし製品の形状・精度を高めるという観点からみると、ロール段数が多いことがそのまま有利な条件となるとは限らない。事実、同一断面を成形するのに、単スタンド成形から順次ロール段数を増していくと、製品の断面形状は著しく変化するが、それが常に改善される方向へ変化するものとは限らない。製品の各部分の形状は、対応する材料各部が成形中にたどる変形径路に支配されるといえるが、それらがロール段数によって如何なる影響を受けるか、あるいはその影響の結果が好ましいものか否かについては、外部から直接知る方法がないので、この問題をあまり単純化して考えると重大な誤りを犯す危険がある。また、実際問題としては、成形機の能力には限界があるため、無制限にロール段数を増すことは許されず、むしろ不足ぎみのロール段数のもとで如何に成形のプロセスを構成するかということが問題となる場合の方が多い。

シーケンスとしてのロールフラワーの適・不適の他に、個々のロールの形状に関する同様の問題がある。例えば、材料を最も確実に噛み込み目的とする曲げ加工を十分に施すのに必要な細部の形状、角曲げ成形を行なう場合の曲げ半径と曲げの中心位置のとり方、角曲げ部をできるだけ鋭く成形するために好ましいロール形状、その他実際に材料を噛み込んで曲げ加工を行なう部分以外に、材料のきそい込みをなめらかに行なうために必要とされる部分の形状などに関連する問題も考えられる。

薄板広幅断面を成形するような場合、材料は中央部へ向って相当量寄り変形をしなくてはならない。この寄り変形がなめらかに行なわれることが、成形プロセスの安定化のためには不可欠の条件となる。そこでこのような成形に用いられるロールに関しては、ロール間隙の値、すなわち板厚に対するその相対的大きさが重要な問題となる。ロール間隔が小の場合、成形時の材料のロール間における断面形状を規制し易くなる反面、材料の寄り変形が非常に困難となり、割れや破断を起し易い。逆にロール間隔が大の場合、寄り変形はなめらかになっても

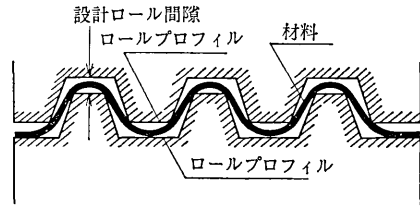


図 16 (ロール間隙/板厚 $\gg 1$ ) の場合の材料の変形形状

断面形状が決りにくく、やはり問題は残る。したがってロール間隙についても最適な値の存在が予想され、十分な検討が必要である。実際生産の場合では、板厚が 1 mm 以下の場合に、設計上のロール間隙を板厚の数倍程度に定めることがしばしばある（図 16 参照）。このような場合には、凹・凸ロール間における素材の変形挙動を適確に把握することがますます困難となり、成形プロセスの設計や製品形状の予測が非常に難しくなる。

成形中の材料は、あるスタンドから次のスタンドへと進んでいく際、一定の割合で漸進的に変形を受けるのではなく、通常、次のロールの直前で急激な変形を受ける。このことは、材料内部に発生する歪の分布の偏りを助長するため、製品形状の不良や局部的な変形の不安定化の原因となる。一般に、ロール径が小の場合にはロール直前における急激な変形が起り易く、ロール径が大なる程、変形が上流側へ拡散され、歪分布が均一化され、材料の変形挙動が安定化する傾向がある。しかしながら、ロール径の大小はそのままスタンド高さやスタンド間隔、ひいては成形機の全体寸法の大小に結びついてくるため、この点に関しても適正值が存在するといえる。

#### (4) パスライン

パスラインとは各スタンドに組み込まれたロールのプロファイル上の対応する点、例えばプロフィールの中央点あるいはプロフィールの図心など、を結んで得られる空間的曲線をいう。したがって、パスラインを定めることは、一連のロールの空間的配置を定めることと同義である。

一般に、ある定められたパスラインに沿う成形プロセスにおいて、材料はロールフォーミング本来の目的である断面成形のための幅方向曲げ歪の他に、局部的な長手方向・幅方向の伸び歪・圧縮歪、あるいは長手方向の曲げ歪を受け、非常に複雑な変形径路を経て製品となる。その結果、製品形状や残留応力などは、このパスラインの変化に伴って大幅に変化するのが普通である。

材料内部に発生するこれら付加的歪成分は、各領域毎に発生の度合が著しく異り、しかもその挙動がたえず変化する。とくに、材料の縁部や中央部あるいは曲げ部の近傍においては、上述の伸び歪や圧縮歪の発生が顕著であり、歪の方向が逆転する際に、座屈や割れなどの不安定現象を起し易い。したがって、これらの付加的歪成分の挙動が成形限界を左右し、成形後に残留して製品形状

の不良化の原因ともなる。

しかしながら現段階では、与えられたパスラインのもとでの材料の変形挙動を正確に把握することができる統一的な理論体系は確立されていない。この問題の難しさは、すでに指摘した通り、成形中の材料が複雑な三次元曲面を呈していること、変形が弾塑性的であること、膜理論では処理できないこと、変形の境界条件が不確定であること、などにある。したがって、所定の製品を成形する場合の適正なパスラインを設計する問題については、その基本的な考え方、評価の手法はもちろん、研究を進める手法すらも不明な点が多く、今後の研究に残された最重要課題の一つである。

さらに注意すべきことは、パスラインの問題は本質的に他の問題と結びついており、独立した問題としては扱い得ない面があるということである。特に、ロール形状すなわちロールフラワーとはある意味で不可分であり、目的とする製品形状が同一であっても、あるロールフラワーを前提とした最適なパスラインは、他のロールフラワーを前提としたものとは当然異なり、しかもこの場合いずれの組み合わせがより好ましいものであるかを判断することは容易ではない。実際には、従来用いられてきた多くの成形機は、パスラインが固定されているのが普通であり、このような場合には問題はむしろ逆で、与えられたパスラインのもとでの最適なロールフラワーの選択という形で提示され、処理されることになる。

(5) 素材材質および機械的特性

ロールフォーミング加工で用いられる素材は、量的にみれば熱延・冷延鋼板が主体を占め、製品によっては銅・黄銅・アルミ・ステンレスその他ニッケル合金・亜鉛合金などが用いられる。これらの素材はそれぞれ特有の機械的特性を有し、比較的成形容易なものから、きわめて難しいものまでさまざまである。一般的には、軟鋼・銅・黄銅・アルミなどは成形し易く、他の合金鋼やジュラルミン等の合金類には成形困難なものが多い。しかし、これらの成形の難易はあくまで材質の面からみた相対的な評価であって、成形自体に関連する難易の問題は別である。

材料の機械的特性のなかで、製品形状の問題と関係があると思われる主なものは、(1)降伏応力： $\sigma_0$ 、(2)降伏点歪： $\epsilon_0$ 、(3)加工硬化指数： $n$  値、(4)ランクフォード値： $r$  値、(5)ヤング率： $E$ 、および(6)塑性域での変形抵抗： $\sigma_p$  である。これらの特性値と製品形状の関係を考察するにあたっては、成形時における材料の変形挙動、および成形後の弾性回復量という二つの面から考えなくてはならない。

成形中に材料に加わる変形のうち、断面成形のための幅方向曲げ変形のみが塑性域に達し、他の付加変形あるいは歪がすべて弾性範囲にとどまるならば、(実際、幅

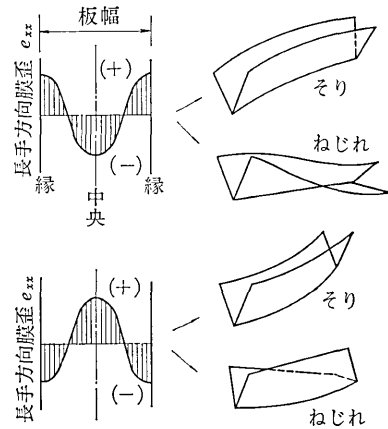


図 17 長手方向膜歪の分布と長手方向形状不良

方向曲げ歪は、他の歪成分に比較してはるかに大きいのが普通である。) これまで述べてきた製品形状に関する問題の多くは本来起こらないはずのものである。その意味で、降伏点歪  $\epsilon_0$  が大きな材料の変形挙動は安定しており、全体的・局所的な形状不良はともに発生しにくい。ただし、このような材料では、成形後の弾性回復量は当然大きくなるので、断面の寸法精度をあげるためには、それを補正するための手段を予め講じておく必要がある。

製品の長手方向のそりおよびねじれは、材料内部に発生する長手方向膜歪の幅方向分布に帰因するものがほとんどである。ただし、この幅方向の分布が局所的なものである場合は、そりやねじれは誘起されにくく、歪の発生領域が幅方向に拡大するにしがたがって、発生し易くなる(図 17 参照)。一般に、加工硬化指数  $n$  値が小さな材料は、歪が局所的に集中し易く、逆に  $n$  値が大きな材料は、歪の発生領域が拡がり易い性質を有している。このような意味から、 $n$  値の大きい材料では、長手方向の形状不良が発生し易い。

製品の断面形状の面からみると、多くの場合これと逆のことが起る。すなわち、断面を成形する立場から考えると、ロールで曲げ加工を施そうとする領域のみが十分に変形することが望ましく、目的とする曲げ加工域が十分に塑性域に達しないこと、あるいは塑性変形域が曲げ加工域を越えて外へ広がることはいずれもが、断面形状を損う原因となる。製品断面の個々の曲げ加工域の中には、ロールによって十分曲げきれない部分、ロールが直接材料を噛むことのできない部分、非常に鋭く曲げることが要求されている部分、できるだけ均一な曲率で曲げたい部分、などいろいろあるが、それぞれの要求に対して、材料の加工硬化特性が好ましい効果を与える場合と、逆の場合とがありうる。

成形後の弾性回復は、成形中に材料に発生した内部応力にもとづく弾性回復モーメント  $M$  によってひきおこ



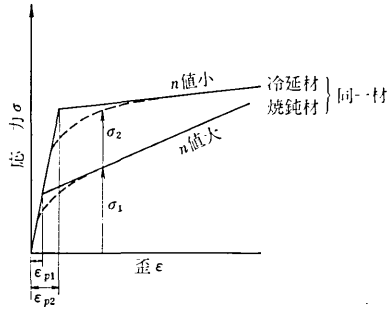


図 18 材料の機械的特性

され、さらに弾性回復量の大小は、そのまま製品形状（ここでは幅方向の断面形状の問題のみを考える）に影響してくる。弾性回復モーメント  $M$  は内部応力の値の大小に依るから、同一の曲げ加工を施した場合、変形抵抗  $\sigma_p$  の大なる材料に発生する  $M$  は、 $\sigma_p$  の小さい材料に発生する  $M$  よりも大きくなる。しかしながら、 $M$  の大小は必ずしも弾性回復量の大小とは対応しない。例えば、材質が異なる場合、 $\sigma_p$  の大きい材料ではヤング率  $E$  も大きい場合が多い。また、材質が同じで熱処理条件などが異なる場合には、 $\sigma_p$  の大小と  $n$  値の大小は通常逆となる（図 18 参照）。 $E$  の大きな材料は  $M$  が大きくとも弾性回復変形に対する剛性が大きく、また、 $n$  値の大きい材料では塑性変形域が幅方向に広がるため、個々の位置における  $M$  は小さくとも、弾性回復に関与する領域の広さが大きくなるため、これらいずれの場合も弾性回復量は単に  $M$  の大小のみでは評価できない。

すでに述べたように、成形中の材料は三次元的な曲面を呈し、この曲面の形状が材料の各部分の変形径路をあらわす。また、通常材料はロール直前において急激な変形を受ける傾向がある。このような材料の変形挙動、特に付加的歪成分の挙動にかかわる変形については、材料のヤング率  $E$  と降伏応力  $\sigma_0$  が大きな影響を与える。 $E \cdot \sigma_0$  が大きくいわゆる腰の強い材料では、変形曲面形状の局部的に急激な変化は起りにくい。このため、歪の分布が本質的に材料の広い領域に平均化されて発生し、その絶対値は小さな範囲にとどまる傾向があり、結果的に製品形状を全体的に均一化する方向に作用する。

さらに、広幅の素材に波付けを行なうような場合には、幅寄せ変形に伴ってこの波の部分には幅方向に大きな引張り応力が作用し、伸び歪が発生する場合がある（図 19 参照）。その際に波部あるいは曲げ部の肉厚が減少する場合と、長手方向に縮む場合とがある。 $r$  値が大きい材料では、このような場合に長手方向に縮む傾向が強くなり、これが原因となって製品が長手方向に縮むことが多い。

以上、材料の機械的特性と製品形状あるいは成形中の材料の変形挙動との関係について代表的な問題点を述べた。この問題については未だ不明の点が多く、また多く

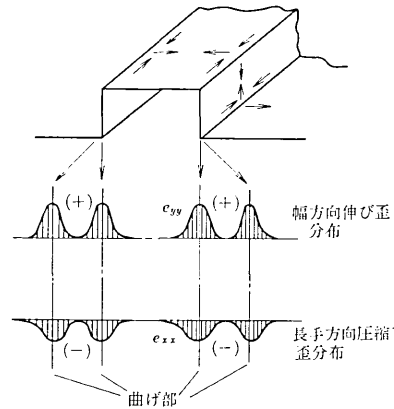


図 19 広幅断面成形時の材料の面内流れ

の特性値の複合された効果が製品形状となって現われるため、それらの総合的な検討が必要となり、解析の手法その他の面で今後に残された問題が多い。

#### 4. 製品形状の制御方法と問題点

製品形状を制御し、所定の形状・寸法精度を得るための方法はいろいろ考えられ、現に実際生産の場においては種々の方法が講じられている。これらの方法を整理してみると、基本的には次の三つの考えに基づいていることが判る。すなわち、

- (1) 所定の断面形状を成形するために必要な幅方向の曲げ変形を十分に加え、同時にそれ以外の付加の変形あるいは付加的歪は、できるかぎり弾性範囲内にとどめるようにすること。
- (2) 幅方向の曲げ変形以外の付加の変形を幅方向に均一化し、局部的な集中をできるだけ抑制すること。
- (3) 発生した付加的歪をできるだけ取り除き、かつ断面の弾性回復変形を消去すること。

以下これらの目的を達成するためにとられているか、あるいはとりうる幾つかの方法について検討してみる。

まず、所定の曲げ加工を正確かつ十分に行なうためには、その曲げ加工部をロールによって正確に噛む込むか、またはおさえこむ必要がある。製品断面の個々の曲げ部はそれぞれ複数段のロール間隙を通り抜けて漸進的に曲げ加工を受けるのであるから、その際に常に正確に個々の曲げ部をおさえ込むことは必ずしも容易ではない。この問題に関しては、例えば幅寄せの必要がない曲げ部の場合、通常、曲げ位置が成形方向の一直線上にくるようにロールを調整することで解決できると考えられているが、この様な考え方は必ずしも正しくない。特に非対称断面の成形の場合には、あるスタンドから出てきた材料が成形方向に真直ぐ進んで次のスタンドに入ることはほとんど期待できない。それ故、上述のようなロールの設定を行なうと、各ロール間隙を通過する毎にロールによ

っておさえ込まれる曲げ加工部にわずかつの狂いが生じ、結果的には製品の形状不良をまねくことになる。幅寄せを伴う曲げ部に関しては問題はさらに複雑となる。

そこで、この問題に対処するためには、所定の成形プロセスやロールフラワーに対応する水平面のパスラインの調整をより積極的に考える必要がある。

付加の変形を抑制し、それらを弾性範囲内にとどめる方法として考えられるのは、まずロール段数を増して、材料の変形をできるだけ漸進的に行なわせることである。しかしそのためには、通常非常に多くのロール段数を必要とするため、この方法のみに頼ることはあまり現実的ではない。また、スタンド間隔を増加させることが、この問題に対して有効であるとの考えもあるが、これは誤っている。すでに指摘したとおり、あるロールスタンドから出て来た材料は、一度弾性回復した後、次のスタンドのロール直前で急激な変形を受ける。このことは、スタンド間隔にはよらない現象であり、スタンド間隔を不注意に増大させることは、かえって成形プロセスの不安定化をまねき易い。むしろ各スタンドのロールによる変形領域が、長手方向に相互に干渉し合わない程度まで、スタンド間隔を縮めることが望ましく、成形プロセスが安定化するといえる。このような見地から判断すると、現在用いられている成形機には、スタンド間隔が大きすぎるため、種々のトラブルをひき起している例が少なくない。

付加の変形の抑制とその幅方向への均一化のための手段として有効な方法は、垂直面内でのパスラインの調整と、ガイドによる材料各部の変形径路の修正である。

パスラインすなわち各ロールの空間的配置は、材料各部の変形径路すなわち付加の変形の挙動を直接支配するので、その調整により材料の変形挙動を制御することは十分可能である。製品の長手方向のそりやねじれの発生原因として最も問題となる同方向の膜歪の幅方向分布について考えてみると、この歪分布をできるだけ幅方向に均一化し、かつその絶対値を弾性範囲内におさえることは、製品形状を整えるうえに非常に大切な条件となる。そのためには、垂直パスラインを調整して、各スタンドのロールのプロファイルを空間に定められた水平面の上下にふり分け、伸び歪と圧縮歪がうまくバランスするように配慮する必要がある。

成形中の材料は多数組のロールによって噛み込まれているが、実際にロールから加工力または拘束力を受けているのは、長手方向にみてごく限られた領域である。したがって、現実には、材料各部の変形径路に対するパスラインの影響力にも限界はある。これに比して、ガイドによる変形径路の修正は、目的とする材料の部分に直接拘束力を加えることにより、極めて有効に行なうものである。このガイドによる修正を適切に行なうことに

より、ロール段数の大幅な削減も可能であり、一般に、ガイドの使用により、時形プロセスが著しく安定化する場合が多く、成形限界の向上が促進される。

成形時のロール間隙の大きさは、ロール間における材料の変形形状とロール形状との適合の問題ともからんで、その適・不適を論じることは非常に困難である。一般に、板厚に比してロール間隙が大きすぎてもあるいは小さすぎても形状不良の原因となる。前者の場合には断面形状の不良、後者の場合には肉べり・割れ・破断・表面傷などを発生し易い。したがって、理想的には、個々のロール毎に、さらに個々のロールのそれぞれの領域毎に、その目的や機能に応じた適切なロール間隙を付与することが望ましいが、これは極めて複雑な問題であり、現時点ではこの問題に関する十分に認識すらされていない。薄板広幅断面の成形の場合などでは、寄り変形をなめらかになるため、板厚の数倍～10倍程度のロール間隙を前提としてロール形状の設計を行なうことが多いが、そのために設計上非常に複雑な問題が入り込むことになる。また成形プロセス自体も不安定な要素を含むことになるため、作業上困難も多い。

このような問題を解消するため、凹・凸ロールを一定間隙を以ってセットする定クリアランス方式の代りに、両ロール間に一定荷重を付加しておく定荷重方式が考えられる。この場合にも、適切な荷重を選択することが難しい問題として残るが、荷重の調整は成形中にも比較的容易に行ない得るため、ロール間隙を最適化する問題に比較すれば、処理し易いといえる。現在、この定荷重方式を採用している成形機は非常に少ないが、この方式は、各スタンドへの荷重配分の問題まで含めて考えることにより、成形プロセスや製品形状の制御の方法として期待できるものと考えられる。

所定の製品を成形するために用いられるロールの総数は、少ない場合でも数10、多い場合には数100(分割ロールについては個別に考える)にも達する。従来、これらのロールの使用目的や付与すべき機能に関する認識があいまいで、単に成形用のロールとして全て同等に考えられ、かつまた扱われてきた。そのため、現場作業者はこれら多数のロールを経験に任せて調整し、所定の製品形状と寸法精度を得るために多大の努力を払ってきた。このような考え方は、実際の成形プロセスを非常に複雑化し、成形中に生起する物理的諸現象の因果関係の把握を困難ならしめ、それゆえにまた、この加工法の技術面での発展を阻害してきたといえる。

これらの成形ロールに関しては、本来、その使用目的や機能を区別して考え、それぞれのロールが果たすべき役目を明確にすることが、種々の問題を単純化し、また外部からの成形プロセスの制御を可能ならしめるためにも、必要不可欠の条件である。例えば粗成形段階で用い

るロールと、仕上げ成形用ロールとに分けることも考えられ、その様な場合でも、それぞれのロールにはまったく別の機能が要求され、したがってまた、その調整の必要度や方式も異って然るべきである。また、広幅断面などの成形に際しては、成形しようとする領域は各スタンド毎に異なるが、その場合、目的とする領域に適確にロールの加工力が加わるような配慮が必要である。

これらの問題に関しては、従来余りにも関心が払わずに看過されてきたきらいがあるが、今後さまざまな角度からの十分な検討が必要であり、その結果として期待される点も多いと考えられる。

成形プロセスのみによっては、所定の形状・寸法精度を有する製品が成形できない場合、成形過程の修了後、レベラー・サイジングロール・タークスヘッドなどを用いて断面形状や長手方向の形状を修正することは、実際生産の場で通常行なわれていることである。しかしこの場合にも、これらの形状修正プロセスを唯まんと消極的な意味で行なうばかりでなく、その役目あるいは機能を積極的に評価することが重要である。これらのプロセスの形状修正能力の限界を明確に把握し、それを十分活用することにより、成形プロセスは簡略化して、より粗成形状の製品を修正プロセスに入ることにより、従来の成形プロセスの大幅な合理化も可能であると考えられる。

## 5. 結 言

本稿においては、塑性加工の分野で大きな役割を果し

つつあるロールフォーミング加工に関して、その製品形状の面から問題点について考察した。しかし、この加工法が余りに膨大な内容を含んでいるため、それらのすべてをここに述べることができず、説明が表面的になり、問題の掘り下げ不十分に終わらざるを得なかった。製品形状に関連しては、いまだ論すべき多くの点が残されており、さらに一歩進んで、所定の製品を成形するための最適プロセスに関しては、問題を扱う方法論さえもいまだ確立されていない状態にある。したがって、今後この方面の研究の一層の発展が期待されるとともに、それらによってもたらされる技術的改善の余地も大きいものと考えられる。

(1972年6月1日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 鈴木・木内・中島・赤堀：塑性と加工，10-97(1969-2)，102.
- 2) 鈴木・木内・中島・赤堀・雪竹・柴田：塑性と加工，10-98 (1969-3)，157.
- 3) 木内：塑性と加工，10-104 (1969-9)，635.
- 4) 木内：塑性と加工，10-104 (1969-9)，646.
- 5) 鈴木・木内・中島・赤堀：日本機械学会誌，73-614 (1970-3)，355.
- 6) 鈴木・木内・中島・市田山：塑性と加工，11-112(1970-5)，315.
- 7) 鈴木・木内・中島・市田山：塑性と加工，11-110(1970-3)，202.
- 8) 鈴木・木内・木村：塑性と加工，12-123 (1971-4)，301.
- 9) 木内：日本機械学会誌，74-631 (1971-8)，28.
- 10) 木内：生産研究，23-11 (1971-11)，13.

