

ロールフォーミングの製品形状と変形機構

The Profile of Cold Roll-Formed Products and Mechanism of Deformation Process.

木 内 学*

Manabu KIUCHI

1. ま え が き

ロールフォーミングとは、ロール成形、Cold Roll Forming, Band Profilwalzungとも呼ばれ、一列に並んだ数組ないし十数組の成形ロールの間にフープ材を通し、漸進的かつ連続的に曲げ加工を施して一様な所要断面を有する管材・型材・プレート類などを得る塑性加工法の1種であって、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る問題であるが、比較的新しい技術であるために、従来実験的にも解析的にも見るべき研究がきわめて少なく、その技術的基盤の形成が著しく遅れている。このため、その技術体系の糸口さえ把握されないままに、断片的な経験の集積により実際生産が行なわれているのが現状である。

近年、わが国においては鉄鋼の生産設備・技術がともに飛躍的な発展を示し、各所に Hot Strip Mill・Cold Strip Mill および Hoop Mill 等の大型高性能の鋼板圧延設備が建設されて品質の秀れた帯板が大量に生産されるようになるとともに、これらの帯板を素材として大量に用いるロールフォーミングが注目されるようになり、現在設備および技術の面で急速な発展と改善が期待されている。

生産量も増加の一途をたどり、製品の種類も軽量形鋼等の建築構造材・各種管材・デッキプレート類・サッシ材・ガードレール・自動車や航空機部品等の様々な分野に広く及んでいる。材料工業としてのロールフォーミングは、当初、各種パイプ工業・軽量形鋼工業によって代表されていたが、C形鋼などの小型の柱材などから始まったロールフォーミングの建築構造材への進出は、現在では4尺幅の板を直接成形し、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・床材の生産により、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。一方、部品工業としてのロールフォーミングは、航空機・自動車・電気冷蔵庫・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。しかしこの分野におけるロールフォーミングの進出はまだまだ日が浅く、その発展は今後課せられた問題であるが、そのためにもロールフォーミングの技術的基盤の形成と学問的体系化が是非共なされなければ

ならない。

筆者等は、工業技術として大きな領域を占めながら学問的技術的基盤の欠除しているこのロールフォーミングの技術の体系化を旨として一連の研究を進めているが、以下これまでで得られた結果を示しつつ、ロールフォーミング加工に関する諸問題のうち、得られる製品形状とそれを規定する各種成形条件因子との関係およびメカニズムなどについて概略を述べる。ただし、紙面の制限により本報で扱うのは円弧形断面の成形の問題に限定する。

2. 問題の所在と研究の方法

ロールフォーミングに関する諸問題を実際的な面から大別すれば、(1)ロールプロフィルの設計および製品精度からみたロール製作の問題、(2)成形工程と成形技術および製品形状制御の問題、(3)成形荷重・成形トルクおよび消費動力算定の問題、(4)成形機製造上の問題、(5)生産ライン構成と付属設備の問題等が考えられるが、これらの諸問題の根底にあるのが、ロールフォーミング加工における素材の変形の形態と特質に関する問題である。各スタンドのロールプロフィルの設計、最適なパススケジュールの決定、ロール径およびロール周速の与え方、製品形状制御の機構、パスラインの最適化とその調節機構、ロール・素材間の接触状態と成形荷重・成形トルクとの関連性などロールフォーミングに関する数多くの問題を解明するためには、成形過程において各スタンドのロールからロールへ移行する素材がたどる変形径路と各種成形条件因子がこの変形径路に与える影響の解明、同時に素材の受ける変形形態の特質を明確に把握すること、さらに成形各ロールが素材に加える束縛の形態ならびに強弱を解明し変形径路や変形形態との関係を明らかにすること、などが必要不可欠な要件となる。

このように多くの問題がまったく未解決のまま残されているロールフォーミングに関して研究を進める場合に、最も重要なことは、できるだけ基本的観点に立ち、広範囲にわたる実験的研究を行ない、それらを通じて成形過程において生起する諸々の物理現象を適確に把握し、整理検討し、上述の問題点を全体的な立場から考察することが必要であると考えられる。

ロールフォーミングによって成形される各種断面形状

* 東京大学生産技術研究所 第2部

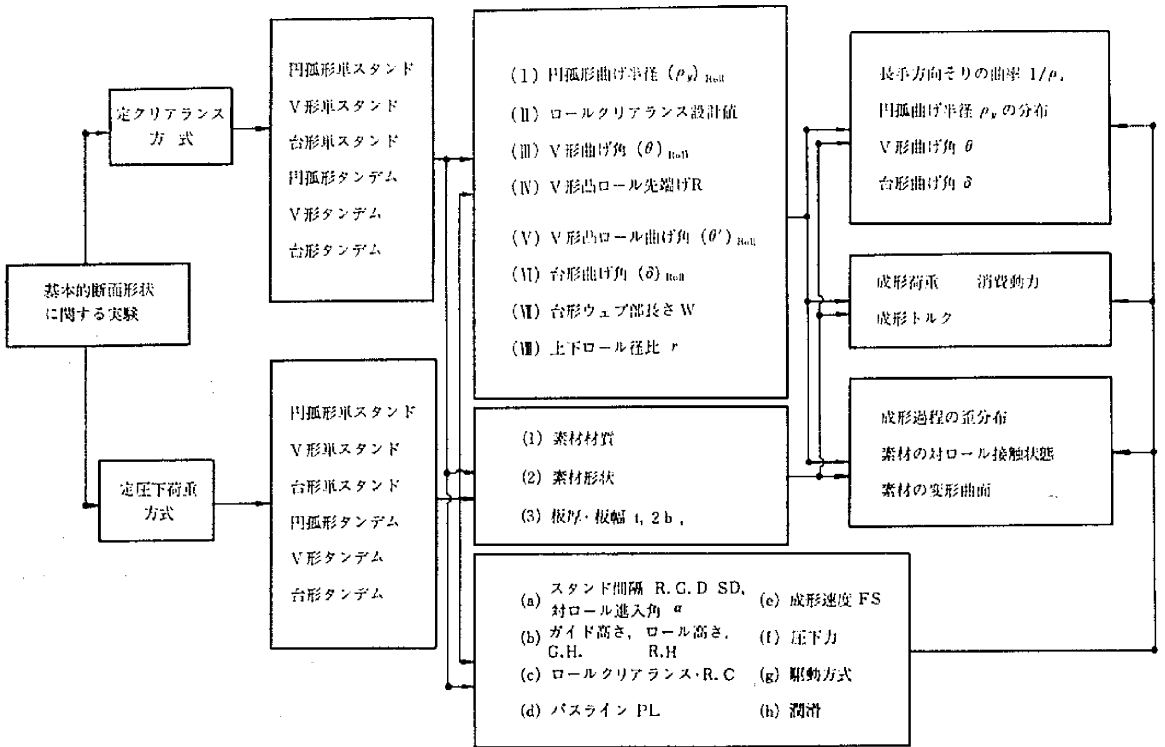


図 1 ロールフォーミングに関する実験的研究における各種因子の関係

およびそれらの成形工程を分析すると、数種類の基本断面とその成形工程により複合構成されているとして理解することが可能である。この基本断面としては、円弧形・V形・台形断面などが考えられる。筆者らは、これら3種の基本断面形状に関して図1に示すような一連の実験的研究を進めている。なかでも円弧形は最も基礎的かつ広範囲に行なわれている断面であり、円弧形断面に関する製品形状と変形過程・変形形態やロールから受ける拘束の形態と強弱あるいは各種成形条件因子との関係に関する研究は、ロールフォーミングに関する全体的研究の立場からみてもきわめて重要である。そこで本報では、円弧形断面の No. 1~3 スタンドの単スタンド成形およびタンデム成形の場合について、各種の成形条件下における素材の変形過程および製品形状の変化をみながら、ロールフォーミングにおける素材の変形に関する基本的諸問題を考察し、同時に製品形状を規定する諸因子の影響と形状決定のメカニズムについて概略を述べる。

使用記号一覧

- RH: ロール高さ (mm), ロールプロフィール底部を±0とし, 素材が凸ロール側より進入する場合を正とする。
- GH: 入口ガイド高さ (mm), 正負の定め方は RH の場合と同じ
- SD: スタンド間隔 (mm)

- RGD: ロール・ガイド間隔 (mm)
- FS: 成形速度 (m/min)
- RC: ロールクリアランス (mm)
- $(\rho_y)_{Roll}$: ロール曲げ半径 (mm)
- D_1, D_2 : 凸ロール最大径, 凹ロール最小径 (mm)
- $2b, t$: 素材板幅, 素材板厚 (mm)
- $(1/\rho_x)$: 製品の長手方向そりの曲率 (mm^{-1}, cm^{-1}), ただし鞍形にそった場合の曲率を正とする。
- $\rho_y(y)$: 製品断面の幅方向曲げ半径分布, $\rho_{y1} \cdot \rho_{y2} \cdot \rho_{y3}$ はおのおの #1・#2・#3 ロール出口の製品形状に関する幅方向曲げ半径を表わす。
- $\alpha = RH/SD, GH/RGD$: 素材のみかけの対ロール進入角, $\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3$ は #1・#2・#3 ロールに対する進入角。
- $\xi = 2b/(\rho_y)_{Roll}$: 成形断面係数, ξ_t は上と同じ。
- $\eta = 2b/t$: 素材断面係数, η_t は上と同じ。
- $\zeta = (\rho_y)_{Roll}/t$: 成形曲げ係数, ζ_t は上と同じ。
- $A = RC/t$: 圧下係数, A_t は上と同じ。
- $f = \rho_y/(\rho_y)_{Roll}$: 成形度, f_t は上と同じ。
- $r = D_2/D_1$: 上下ロール径比, r_t は上と同じ。

3. 実験方法

実験は平ロールを組合わせた入口ガイドと、1~3組の円弧形成形ロールを図2のように配置し、左から素材をそう入し円弧形半開断面の製品を得る。成形ロールは

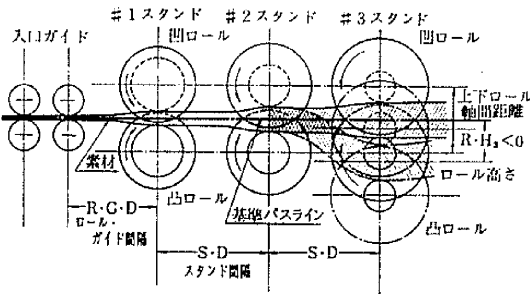


図 2 3 スタンドタンデム成形実験概略図

素材材質	SS41 相当ミルスケール付
素材板幅 $2b$	60・100・140・180 mm
素材板厚 t	3.0 mm
ロール曲げ半径 ($\rho_{p,roll}$)	180・90・60 mm
上下ロール組合わせ	A・B・C・D・E
スタンド間隔 SD	400・800 mm
ロール高さ RH	-30・-20・-10・ ± 0 ・10・20・30 mm
ロールクリアランス RC	2.9・3.0・3.1・3.2・3.4 mm
成形速度 FS	30・60・90 m/min
スタンド組合わせ	#1, #1+#2, #1+#2+#3
駆動方式	上下軸直結強制駆動
潤滑	素材表面にダイロール S 20 原油を塗布
圧下条件	ワークサイド (WS)・ドライブサイド (DS) を 100 kg で均等締め

- 注 (1) 下線を施した値を標準値とする。
 (2) ($\rho_{p,roll}$) は #1・#2・#3 スタンドの値がそれぞれ 180・90・60 mm である。
 (3) ロールクリアランス設計値は 3.0 mm である。

図 3 E・C系クリアランス方式・円弧形単スタンドタンデム成形実験条件一覧表

凹ロールを上、凸ロールを下に配し、凸ロールプロフィール先端が水平な一直線上にある場合を基準バスターンとして、これより GH, RH の値を定める。GH, RH の正負は素材が凸ロール側より進入する場合を正とする。圧下調整は定クリアランス方式を採り、RC は円弧形プロフィール底部で設定する。実験条件の 1 例は図 3 に示すごとくであるが、実験では各種条件因子の単独効果の解明に主眼を置いているので、ある特定の条件因子の水準を変化させる場合には他の条件因子の水準をあらかじめ定めてある標準値に保つことを原則とする。

ロールフォーミングは、その加工法の特徴として長尺一様断面の製品を連続的に大量生産できることがあげられているが、製品を真直かつ正しい所要断面に仕上げることはきわめて難しく、実際には現場作業者が経験的に成形条件を調整して目的とする形状を得ている。そこで、ロールフォーミングで得られる製品の形状は、大別して長手方向の真直性と所要断面形状への成形度に関する形状因子とによって評価するのが妥当である。本実験では

上記の各種成形条件下で得られた製品の形状を、全体的形状因子の長手方向そり曲率 ($1/\rho_x$) と部分的形状因子の断面各部の曲げ半径の幅方向への分布 $\rho_y(y)$ で把握し検討する。

4. 成形過程における素材の変形形態と各種付加的歪成分の分布ならびにその推移

ロールフォーミングによる成形は、プレスやプレスブレーキなどによる一次元曲げ成形と異なり、素材は各スタンドの成形ロールにより漸進的な曲げ加工を受ける。したがって成形過程にある素材を全体的にみると、きわめて複雑な三次元的な変形曲面を呈し、素材の幅方向の異なる位置にある各部はおのおの異なる空間的軌跡をたどり異なる歪径路を経て成形を受ける。ロールフォーミング本来の目的は素材に幅方向の曲げ加工を施し所定の断面形状を得ることにあるが、上述のような加工上の性質から、成形過程にある素材には所要断面成形のための幅方向曲げ歪 (以下 e_{yb} で表示する) が加わるばかりでなく、幅方向・長手方向・板厚方向の伸び・圧縮の膜歪 (以下 $e_{yy} \cdot e_{xx} \cdot e_{zz}$ で表示する) や長手方向曲げ歪 (以下 e_{xt} で表示する) などの各種の付加的歪成分が必然的に加わる。これらの付加的歪成分は e_{yb} と互いに作用し合い、素材内部の応力状態・製品形状・残留応力分布さらには成形限界などを規定し、重要な役割を果たす。先にも述べたようにロールフォーミングの基礎をなす問題は、これら付加的歪成分の成形過程における挙動・分布形態とその推移を適確に把握し、その影響や e_{yb} との相互作用のメカニズムおよび強弱を解明することにある。実際の成形過程において、幅方向の異なる位置にある素材各部は、成形条件により規定される異なる歪径路をたどるので、付加的歪成分の大きさと加わる順序および e_{yb} との相互作用は素材各部で異なる。ゆえに円弧形断面を有するロールにより成形しても、製品の断面形状が必ずしも一様な円弧形になるとは期待できない。

ロールフォーミングの成形過程において素材が受けるこのような変形径路を実際に把握するため、筆者らは、素材表面に抵抗線型歪ゲージを貼付する方法により各種歪成分の分布ならびに推移を直接測定した。測定の方法は図 4 に示すように素材表面上の定められた位置に表裏対にして塑性歪ゲージを長手方向と幅方向に貼付し、これを所定の成形条件のもとで成形し、その各過程においてロール直下からゲージまでの距離とそのときの歪の値を測定する。この方法で測定される表面歪から素材内部の膜歪と曲げ歪を求める。図 5 には単スタンド成形で $\alpha=0$, $\xi=1.4$ の場合の長手方向表面歪が成形過程において変化する推移の測定例を示す。

このような測定結果を通じて、(1) 一般に成形過程にある素材はロール直前にきてから急激な変形を受ける。

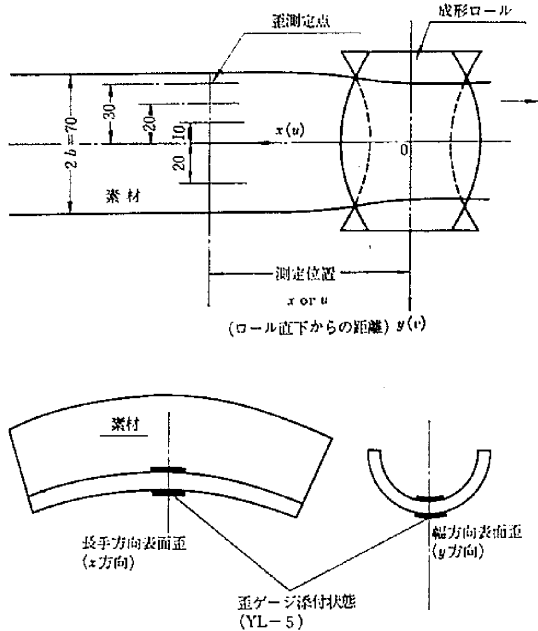


図 4 ロール入口側の素材のひずみ分布測定方法説明図

(2) 素材はロール直前において長手方向に激しく曲げや曲げ戻しを受ける。(3) 素材は成形過程において幅方向の曲げ変形を一樣に受けるのではなく、成形過程の比較的早い時点で強く曲げられる部分と、逆にロール直前・直下で急激に曲げられる部分とがある、(4) 各種付加的歪成分 $e_{xx} \cdot e_{yy} \cdot e_{xb}$ の成形過程における分布形態とその推移は必ずしも単調ではない、等の結果を得ることができる。これらはいずれもロールフォーミングの変形形態の重要な特徴と考えることができる。また素材各部が受ける変形過程のこのような相違は当然製品形状に大きな影響を与えるものと考えられる。

筆者は、別に行なった解析的研究において、各種付加的歪成分およびその歪径路が断面成形のための幅方向曲げ変形に与える影響を細かく検討したが、その結果を上記の歪径路の測定結果に適用すると得られた製品形状と歪径路が良く対応していることが解る。たとえば、膜歪 $e_{xx} \cdot e_{yy}$ は幅方向曲げ応力 σ_y の板厚方向の分布を板の中央面に対して対称化する効果を有し、その絶対値が大なる程、成形後の製品の弾性回復量が減少することが期待されるが、事実 $e_{xx} \cdot e_{yy}$ の絶対値が大となる歪径路を通った部分は他の部分に比較して成形度が良好な結果が得られている。図 6 はタンデム成形の場合の各スタンドのロール直前における e_{xx} の分布形態の対ロール進入角 α による変化を示す。 e_{xx} の分布形態は #1 ロール ($\xi_1=1.0$)、#2 ロール ($\xi_2=2.0$) の場合 α に対してほぼ同じ変化を示す。これらは各ロール入口側での素材の呈する変形曲面形状や空間的軌跡の相対的長短と対応するものである。#3 ロール ($\xi_3=3.0$) に関しては #3 ロール入口

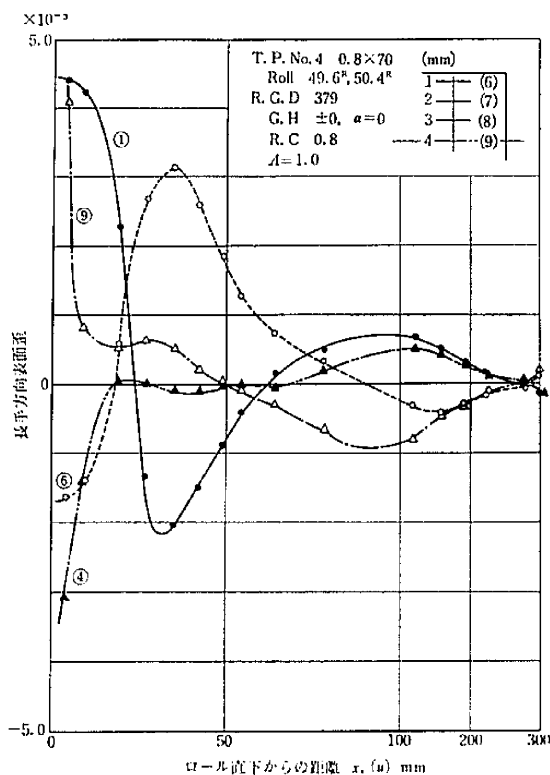


図 5 長手方向表面ひずみの推移 (例)

側だけでなく #2 ロール出口での素材の変形曲面形状や空間的軌跡長の相対的関係をあわせて考慮する必要があると考えられる。このように素材の歪径路あるいは各種付加的歪成分の分布形態およびその推移は成形条件因子の変化に伴って大きく変化し、その結果として製品形状の変化が起こる。

5. 製品形状に関する実験結果ならびに考察

(1) 各種成形条件因子が製品の長手方向のそり曲率 ($1/\rho_x$) に与える影響

一般に素材を幅方向に曲げると長手方向のそりが誘起されて製品は鞍形 ($1/\rho_x > 0$ と定める) になりやすいことが知られているが、ロールフォーミングではその加工法上の特質から、成形過程において上記各種の付加的歪が生じこれが長手方向のそりを大きく左右する。なかでも $e_{xx} \cdot e_{xb}$ の影響が支配的である。したがって各種成形条件因子のうち e_{xx} と e_{xb} との分布形態と値の大小とに大きな影響を与える条件因子ほど長手方向のそりに大きな影響を与える。すなわち、パスラインまたは素材の対ロール進入角 α 、成形断面係数 ξ 、素材断面係数 η 、成形曲げ係数 ζ 等により ($1/\rho_x$) は大きく変化するが、 $e_{xx} \cdot e_{xb}$ に直接的な影響を与えない条件因子である圧下係数 A 、上下ロール径 D_1, D_2 、成形速度 FS 等は極端な場合を除いて ($1/\rho_x$) にほとんど影響を与えない。図 7 はタンデム成形 (#1: $\xi_1=1.0$, #2: $\xi_2=2.0$, #3: $\xi_3=3.0$) の場

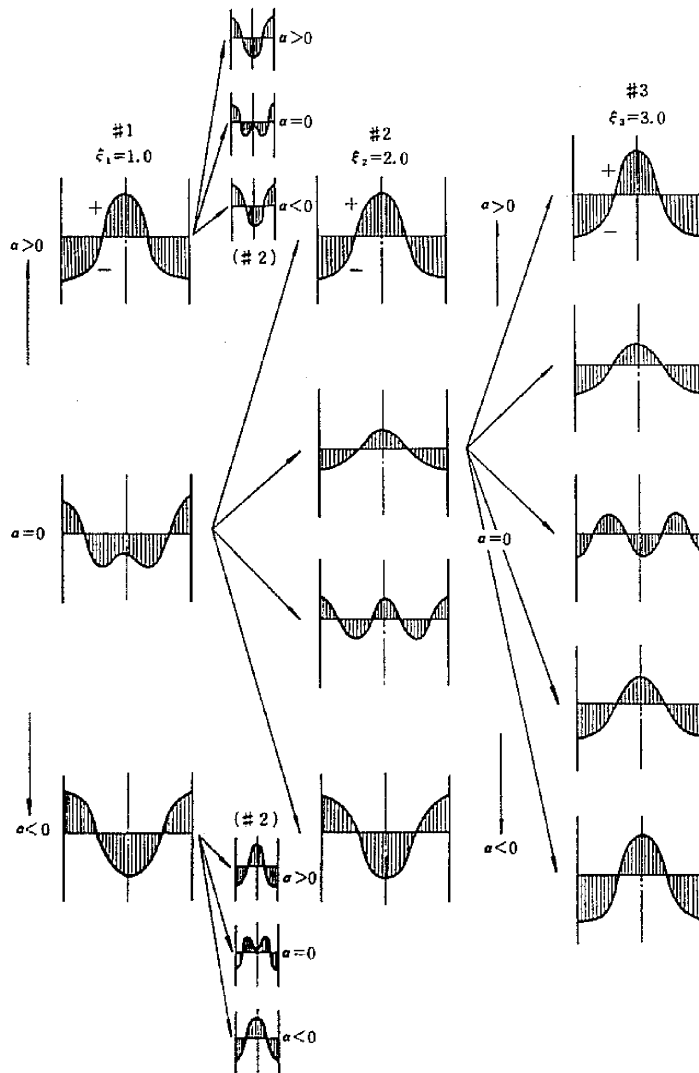


図 6 タンデム成形の場合の長手方向膜ひずみ分布の推移 (2b: 一定, $(\rho_x)_{Roll}$: 変化)

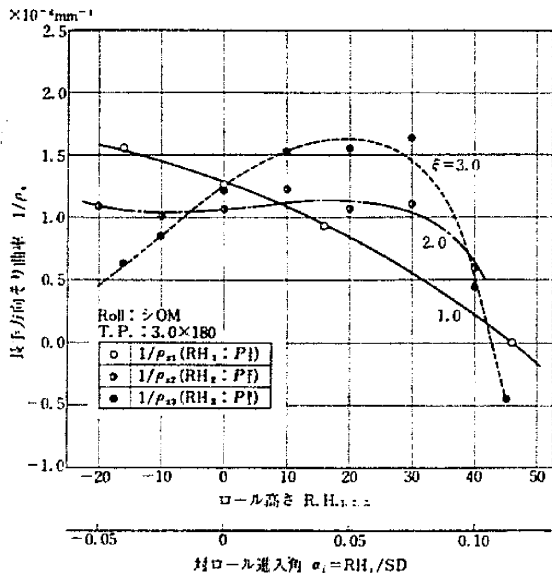


図 7 ロール高さ RH が製品の長手方向曲率 $(1/\rho_x)$ に与える影響

合の各スタンドの α_i による $(1/\rho_x)_i$ の変化を示す。一般に単スタンド成形の場合には α が負から正へ変化すると $(1/\rho_x)$ は正から負へと単調に減少する。 α に対する $(1/\rho_x)$ の上記のような変化は α に伴う e_{xx} の分布形態の変化と対応している。 $\alpha < 0$ の場合には素材は凹ロール側から進入し、中央部に比較して縁部は空間的に長い軌跡を描くため縁部では $e_{xx} > 0$ 、中央部では $e_{xx} < 0$ となり、結果的には製品は鞍形にそり $(1/\rho_x) > 0$ となる。 $\alpha > 0$ の場合は逆に素材は凸ロール側から進入し中央部で $e_{xx} > 0$ 、縁部で $e_{xx} < 0$ となり $(1/\rho_x) < 0$ となる。RGD あるいは SD が増大し入口ガイドまたはスタンド相互間の素材進入径路に与える束縛が弱まると e_{xx} の分布が平均化され $(1/\rho_x)$ の変化の度合いが減少する。 $\alpha = 0$ の近傍では ξ が小さい限り e_{xx} の分布の偏りはさほど大きくない。 ξ が増大すると e_{xx} の分布の偏りが助長され、そりが誘起されやすくなるが、他方断面の長手方向曲げ剛性が増大するため ξ と $1/\rho_x$ の間の対応関係は必ずし

も明瞭ではない。α≠0 の場合にはξの大きい断面ほど進入径路の差異によるe_{xx}の分布の偏りが大きく現われるため、ξによる(1/ρ_x)の変化が明瞭になる。

タンデム成形の場合には図7から明らかなように、ξの増大と共にαに対する(1/ρ_x)の関係が著しく変化する。特にξ₃=3.0の場合には明瞭な極大値を示す。このようにαに対する(1/ρ_x)の関係がξによって大きく異なるのは、タンデム成形の場合にはe_{xx}およびe_{xy}の分布形態がξとαにのみよって決定されるのではなく、隣接するスタンド間のξの値の相対的大小と上流側スタンドにおける素材の歪径路により規定されるためである。図6に示すようにタンデム成形の場合には上流側のξが比較的小さいスタンドで発生するe_{xx}の分布と、下流側のξが大きいスタンドで発生するe_{xx}の分布形態が逆転する場合がある。これは当該スタンド入口側の素材の進入径路や空間的な軌跡の長さによるばかりでなく、隣接する上流側スタンド出口側に関しても同様な歪径路に対する検討を必要とする事を示している。α=0で板厚tが増大するとe_{xy}の増大に伴うe_{xx}の増大の(1/ρ_x)に対する寄与の増加により、(1/ρ_x)は正の方向へ変化する。またα=0の近傍ではe_{xx}・e_{xy}の分布はロールが素材に加える束縛の強弱にほとんど影響されず、ξのいかんによらず(1/ρ_x)はAの影響を受けない。

α=0の近傍で板幅2bを変化させると一般にξの減少と共に(1/ρ_x)が増大する。ξが減少すると|e_{xx}|が減少し幅方向の分布は均一化するが、他方成形断面の長手方向曲げ剛性の急激な減少とe_{xx}のそりに対する寄与の増大が起こり結果的に(1/ρ_x)が増大する。但し2b=一定で(ρ_v)_{Roll}が変化する場合にはξと(1/ρ_x)の間には1対1の対応関係が必ずしも成立しないのは先に述べたとおりである。

上下成形ロール径の大小は素材に対するロールの束縛形態を規定する主要因子であり素材の対ロール進入径路に影響を与える。一般に成形過程にある素材はロール直前にきて急激な変形を受ける傾向があるが、ロール径の大小はこの急激な変形を受ける素材領域を拡大・縮小させる効果があり、ロール径の大きな程変形は広い領域に分散させられる。しかし実際にはロール径増大はスタンド間隔増大に直接結びついており、またロール入口側でのロールが素材におよぼす束縛は比較的弱いものであるから、極端な場合を除けば通常の成形条件の範囲内ではロール径の影響はほとんどないといえる。

(2) 各種成形条件因子が製品の幅方向曲げ半径分布ρ_v(v)に与える影響

既述のように、ロールフォーミングによる成形の特質は素材にその本来の目的である断面成形のための幅方向曲げ歪e_{xy}ばかりでなく各種付加的歪成分e_{xx}・e_{xy}・e_{yy}・幅方e_{xx}などが加わることにある。こたらの付加的歪成

分は幅方向曲げ変形および応力σ_vの分布に大きな影響を与え、成形後の弾性回復量を左右することを通じて製品形状を支配する要因となる。各々の付加的歪の大きさと加わる順序は、素材幅方向の各部で異なるので、σ_vの大きさと板厚方向にみた分布形態も素材各部でまったく異なるものとなる。したがって弾性回復量にも差異が生じ、円弧形ロールにより成形された製品断面が必ずしも一律な円弧形とはならない。製品断面の幅方向曲げ半径ρ_vに対する付加的歪成分の効果は相当複雑なものとなるが、歪径路が明確で付加的歪成分が単独または定まった順序を追って次々と付加される場合には比較的明確にその効果を評価することができる。筆者等は、この問題に関してロール直下において素材各部が受けると考えられる種々の変形形態を個別的に採りあげ、e_{xx}、e_{xy}、e_{yy}、e_{xx}がρ_vの分布あるいは大きさに与える影響について解析を進めている。その結果e_{xx}、e_{yy}はその絶対値が大きいほど弾性回復量を減少させる方向に作用すること、e_{xy}は素材が凸ロールに沿って進入する場合には弾性回復量を減少させる効果が少なく、凹ロールに沿って進入する場合には効果が大きいことなどを明らかにした。

しかしながら実際の成形過程においては付加的歪成分は常に複合された状態で素材に加わりその歪径路もかなり複雑であるため、それらの複合効果を適確に評価することはかなり困難である。またそれらの効果を単独効果の単なる重ね合わせとして評価することについても問題

図8, 9にはタンデム成形 (ξ₁=1.0, ξ₂=2.0, ξ₃=3.0)

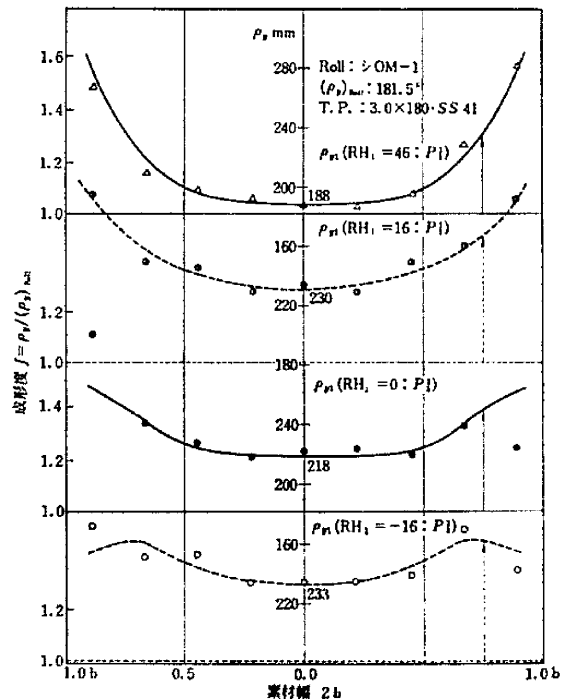


図8 1 スタンドのロール高さが幅方向曲げ半径ρ_vの分布に与える影響

Roll: シ OM-3 (ρ_v) Roll: 61.5°, T.P.: 3.0×180・SS41

■ ρ_{v1} (RH ₂ =45:Pf)	△ ρ_{v2} (RH ₂ =10:Pf)
□ ρ_{v1} (RH ₂ =40:Pf)	● ρ_{v2} (RH ₂ =0:Pf)
○ ρ_{v1} (RH ₂ =30:Pf)	● ρ_{v2} (RH ₂ =-10:Pf)
▲ ρ_{v1} (RH ₂ =20:Pf)	○

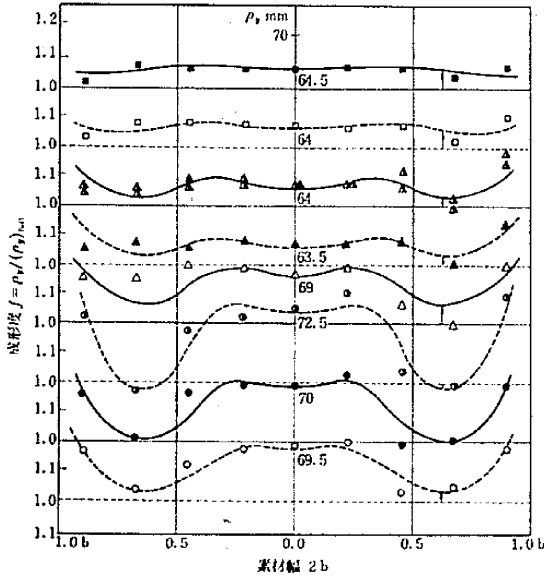


図 9 #3 スタンドロール高さ RH₂ が幅方向曲げ半径 ρ_v の分布に与える影響

がある。筆者等は、この点について付加的歪成分の一般的歪径路における複合効果を評価する手法について目下検討を進めている。以下これらの点を考慮しつつ各種成形条件因子が ρ_v の幅方向への分布に与える影響について述べる。

図 8, 9 にはタンデム成形 ($\xi_1=1.0$ $\xi_2=2.0$ $\xi_3=3.0$) の場合の #1, #3 スタンドロール高さ RH₁, RH₃ または α_1, α_3 による ρ_{v1}, ρ_{v2} の分布形態の変化を示す。縦軸には成形度 $f = \rho_v / (\rho_v)_{Roll}$ をとってある。まず ξ の値の大小すなわち成形が進行し断面が深くなるに従い ρ_{vi} の分布形態自体が非常に異なるものとなるが、それらの分布形態がさらに α_i によって規則的な変化をすることがわかる。同時に α による影響の現われ方は ξ により異なる。

$\xi_1=1.0$ (#1 スタンド) では、 $\alpha_1=0$ の近傍で ρ_{v1} の分布は幅方向にはほぼ一様であるが、 $\alpha_1>0$ となるに従い素材中間部から縁部へ向って成形度は悪化し ρ_{v1} は急激に増大する。これは $\alpha_1>0$ となるに従い付加的歪成分のうち e_{xx} が次第に正から減少することと e_{yb} が正から負に転じるための効果が現われたものと考えられ、 α_1 が極端に大きくなり e_{xx} が負に転じその絶対値が十分大となれば縁部の成形度は再び改善されることが予測される。一方素材中央部は e_{yb} 自体が他の部分に比較して大きくなることに加え $e_{xx}(>0)$ が十分大きく成形度は良好である。一方、 $\alpha_1<0$ になると素材縁部では $e_{xx}(>0)$ の値が増大し、また e_{yb} が正側に大きくなる効果が現わ

れて ρ_{v1} は減少し成形度は改善される。このとき中央部では e_{xx} が正から負に転じるため絶対値が減少し成形度は次第に悪化する。

$\xi_3=3.0$ (#3 スタンド) では、 $\alpha_3=0$ のとき素材中間部から縁部へかけて ρ_{v2} の極小値が生じ $f=1.0$ となる。この極小値は #2 スタンドの $\alpha_2=0$ においても現われ、 α_2, α_3 が 0 の近傍にある限り明瞭に見られる。これは付加的歪成分の影響ばかりでなく e_{yb} の分布自体の影響も含んでおり、ロール間にかみ込まれた素材が必ずしもプロフィールに沿って幅方向に曲げられておらず、特に実際の成形時にロールの設定時間隙が増大すると素材は幅方向に節を以って曲がる傾向を示すことなどによる。 $\alpha_3>0$ となるに従い #1 スタンドの場合と同様の $e_{xx} \cdot e_{yb}$ の効果が強まり中央部ならびに縁部の成形度は改善され ρ_{v2} の分布は次第に均一化される。 $\alpha_3=0.113$ の場合には ρ_{v2} の分布はほぼ水平な直線状となり $f=1.08$ となる。また $\alpha_3<3$ となっても同様な ρ_{v2} の分布の均一化と成形度の改善が起こる。

設定ロール間隙 RC (圧下係数 A) の ρ_v の分布に与える影響をみると、 A の変化特に 1.0 よりの増大に対して ρ_v の分布形態自体は変化せず、 $A=1.0$ で成形度不良であった部分はますます悪化するが $A=1.0$ で成形度良好であった部分は A の値に関係なく良好である。したがって A 増大に伴い ρ_v の分布の変動は激しくなる。既述のように $(1/\rho_x)$ が A の影響をほとんど受けない事実と対比させて考えると、 A の増大に伴う $e_{xx} \cdot e_{yb}$ の分布形態とその推移の変化は微小であると考えられ、 ρ_v 分布のこのような変動の増大は A の増大に伴うロール素材間の接触圧力分布の形態と強弱の大幅な変化およ

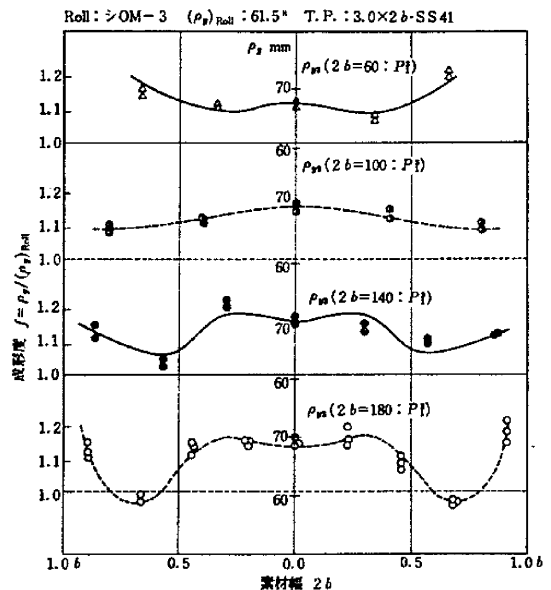


図 10 素材板幅 2b が幅方向曲げ半径 ρ_v の分布に与える影響

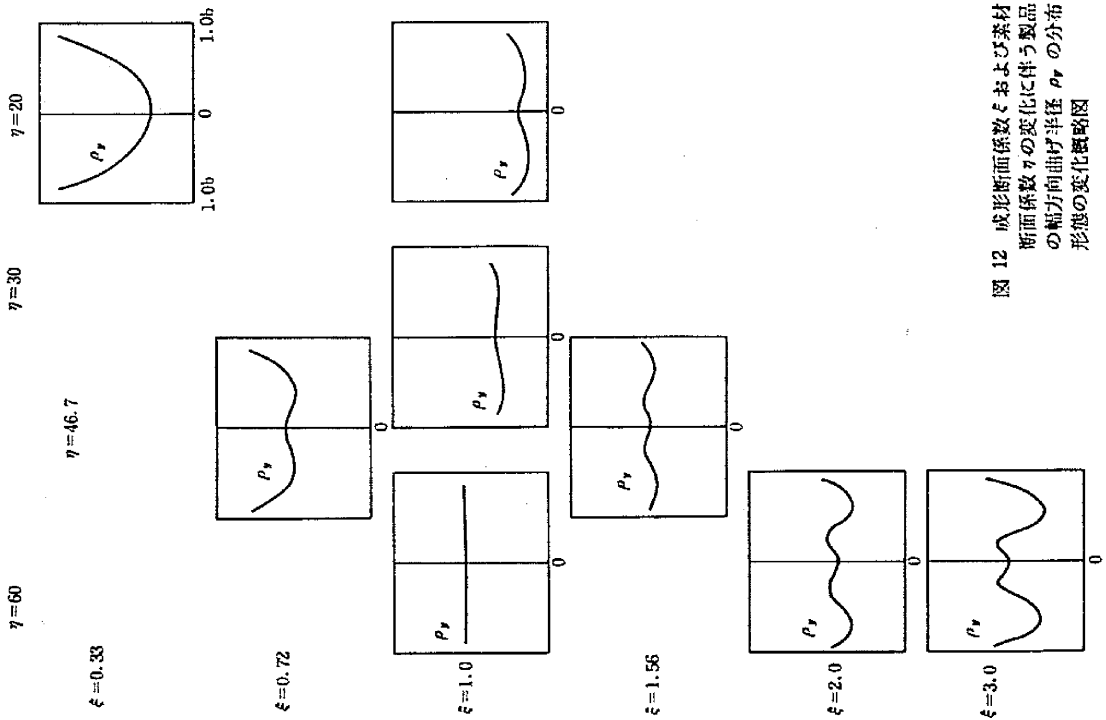


図 12 成形断面係数 ξ および素材断面係数 η の変化に伴う製品の軸方向曲げ半径 ρ_y の分布形態の変化概略図

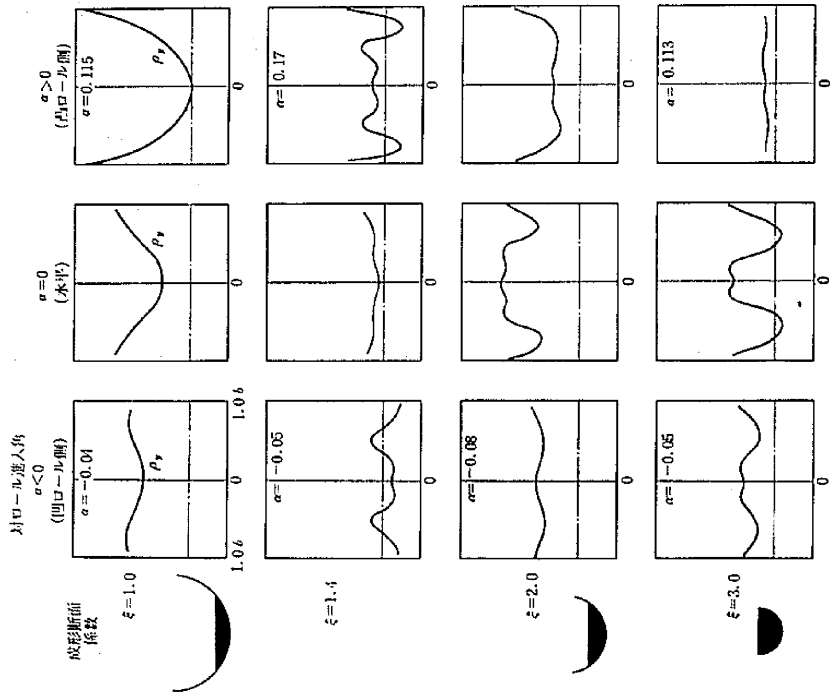


図 11 成形断面係数 ξ および素材の対ロール進入角 σ の変化に伴う製品の軸方向曲げ半径 ρ_y の分布形態の変化概略図

びそれに付随する e_{vb} の部分的な解放によるものと考えられる。

図 10 にはタンデム成形の場合の #3 スタンド出側における素材幅 $2b(\xi)$ の変化に対する ρ_{vi} の分布形態の変化を示す。この場合各スタンドの $(\rho_v)_{\text{Roll}}$ を各一定としてある。 $(\rho_v)_{\text{Roll}}$ の値にかかわらず $\xi_i=1.0$ を満足する $2b$ を与えた場合 ρ_{vi} の分布が均一化される傾向があり、 ρ_{vi} の分布にもそれが見られる。ただし f の値自体には $(\rho_v)_{\text{Roll}}$ の値により相違があり下流側スタンドで成形が進むほど弾性回復量は減少し f は 1.0 に近づく。 $\xi_i > 1.0$ になると素材中間部から縁部へかけての一部分の ρ_{vi} が次第に設計値に近づき f に明瞭な極小値が生じ、他方中央部および縁部の成形度はむしろ悪化の傾向を示す。 $\xi_i < 1.0$ になると縁部の成形度は次第に悪化し f の増大が激しくなる。

このような $2b$ すなわち ξ の変化に伴う ρ_v の分布形態の本質的ともいえる変化は、まず ξ の変化と共にロールの素材に対する束縛がまったく異なるものとなり、その結果素材の対ロール進入径路および $e_{xx} \cdot e_{xx} \cdot e_{yy}$ 等の各種付加的歪成分ばかりでなく、幅方向曲げ歪 e_{vb} 自体の分布および推移が大きく変化するためと考えられる。 $\xi_i=1.0$ が ρ_{vi} 分布の均一性を与える境界の値となることの原因ははまだ明確ではないが、素材幅に対する、a) 断面深さ、b) 立上り角、c) 進入径路と空間的軌跡長などの相対的大小関係から考えて $\xi_i=1.0$ の近傍で最も無理のない成形条件が満たされていると考えられる。

図 11, 12 には以上述べた $\alpha \cdot \xi \cdot \eta$ による ρ_v の分布形態の変化の概略図を示す。この他成形速度 FS, スタン

ド間隔 SD, ロール径 $D_1 \cdot D_2$ 等の影響は微小である。

6. 結 言

本報ではロールフォーミングにより成形される各種断面形状の構成要素として最も基本的な円弧形断面の単スタンドおよびタンデム成形を例にとり、成形過程における素材の変形径路とその特質および各種成形条件因子が製品形状に与える影響のメカニズムについてその概要を説明した。製品形状に対しては、成形過程における素材各部の変形径路およびその際発生する各種付加的歪成分の分布形態や推移が重要な意味を有することを明らかにし、長手方向そり曲率 $(1/\rho_x)$ は長手方向膜歪と曲げ歪分布に主として支配され、幅方向曲げ半径分布 $\rho_v(y)$ は a) 幅方向曲げ歪, b) 各種付加的歪成分, c) 接触圧分布に支配されるという意味から、各種条件因子の影響は第 1 に素材の対ロール進入径路を通じて、第 2 にロールの素材に対する束縛の形態と強弱に与える影響の度合により評価できることを示した。

(1969年9月25日受理)

参考文献

- 1) 鈴木・木内他：ロールフォーミングに関する実験的研究 第 1 報「塑性と加工」Vol. 10, No. 97 (1969-2)
- 2) 鈴木・木内他：ロールフォーミングに関する実験的研究 第 2 報「塑性と加工」Vol. 10, No. 98 (1969-3)
- 3) 木内：ロールフォーミングに関する解析的研究 第 1 報「塑性と加工」Vol. 10, No. 104 (1969-9)
- 4) 木内：ロールフォーミングに関する解析的研究 第 2 報「塑性と加工」Vol. 10, No. 104 (1969-9)

