

---

26 インチケージ成形電縫鋼管ミルにおける材料の変形挙動の荷重特性

Seel Sheet Deformation Behavior and Forming Load Determination in the 26-inch Cage Forming ERW Pipe Mill

横山 栄一(Eiichi Yokoyama) 富岡 高明(Takaaki Toyooka) 江島 彬夫(Akio Ejima)  
吉本 勇三(Yuzo Yoshimoto) 河手 崇男(Takao Kawate) 桑田 一義(Kazuyoshi Kuwata)

---

要旨：

26 インチケージロール式電縫鋼管ミルの成形過程中的材料の変形挙動（ひずみ履歴，投影軌跡，フラワー形状）およびフィンパス，スクイズロール成形荷重について調査し，以下の結果を得た。(1) エッジの長手方向ひずみはゲージゾーン内ではゆるやかな変化を示すのみであるが，フィンパスロール進入前後には圧縮も含む急激な変化を受ける。(2) No.1 フィンパス成形ではエッジの増肉変形が主体であるのに対し，No.2 フィンパス成形では円周方向にほぼ均等な絞り変形が行われる。(3) 成形荷重は材料の強度と板厚および成形絞り量に依存し，近似的には管周方向圧縮に要する力と曲げに要する力の和として関数化される。

---

Synopsis：

Behavior of steel sheet deformation as expressed in stain history, projection trace and forming flowers, and methods of determining forming load at fin pass rolls and squeeze rolls have been investigated in the 26-inch cage forming ERW pipe mill. The results are as follows: (1) For the longitudinal strain of the sheet edge, only a gentle deformation is observed in the cage forming zone, while a considerably rapid deformation consisting mainly of tension and including compression is noticed at the time of passing through each fin pass roll. (2) The local increase in wall-thickness around the sheet edge is caused mainly by No.1 fin pass roll forming. On the contrary, almost uniform compressive deformation is conducted by No.2 fin pass roll forming. (3) The forming load, which depends strongly on the strength and wall-thickness of sheet, can be expressed by the summation of forces which are necessary for the circumferential reduction and the bending of sheet.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

## 26 インチケージ成形電縫鋼管ミルにおける 材料の変形挙動と荷重特性

Steel Sheet Deformation Behavior and Forming Load Determination  
in the 26-inch Cage Forming ERW Pipe Mill

横 山 栄 一\*  
Eiichi Yokoyama

豊 岡 高 明\*\*  
Takaaki Toyooka

江 島 彬 夫\*\*\*  
Akio Ejima

吉 本 勇 三\*\*\*\*  
Yuzo Yoshimoto

河 手 崇 男\*\*\*\*\*  
Takao Kawate

桑 田 一 義\*\*\*\*\*  
Kazuyoshi Kuwata

### Synopsis:

Behavior of steel sheet deformation as expressed in strain history, projection trace and forming flowers, and methods of determining forming load at fin pass rolls and squeeze rolls have been investigated in the 26-inch cage forming ERW pipe mill. The results are as follows:

- (1) For the longitudinal strain of the sheet edge, only a gentle deformation is observed in the cage forming zone, while a considerably rapid deformation consisting mainly of tension and including compression is noticed at the time of passing through each fin pass roll.
- (2) The local increase in wall-thickness around the sheet edge is caused mainly by No. 1 fin pass roll forming. On the contrary, almost uniform compressive deformation is conducted by No. 2 fin pass roll forming.
- (3) The forming load, which depends strongly on the strength and wall-thickness of sheet, can be expressed by the summation of forces which are necessary for the circumferential reduction and the bending of sheet.

### 1. 緒 言

従来中径電縫鋼管の製造には孔型ロール成形方式が多く採用されてきたが、最近における中径電縫鋼管の高強度化、大径化傾向にともない、ケージロール成形方式の有効性が再確認されはじめた。当社はケージロール方式による26インチ中径電縫鋼管ミル建設に着手し、昭和53年10月以来、薄肉高強度材はもとより厚肉高強度材を含む広範囲の管サイズにわたって、主として高級ラインパイプの製造を開始し現在にいたっている。

本設備の特徴<sup>1-3)</sup>としては、フィンパス成形にいたるまでの曲げ成形ラインに数10個の対になったケージロールを配列し、あわせてダウンヒル成形を採用することにより、従来の孔型ロール成形にくらべて拘束の弱い自然な空間成形を行いエッジストレッチを低減し、生産性の向上と製造範囲の拡大化をはかったものである。しかるに電縫鋼管の溶接品質向上には、溶接条件の最適化<sup>4-7)</sup>はもとより、ブレイクダウン、フィンパスおよびスクイズロールにいたる成形条件がきわめて重要であり、なかでも肉厚/外径の小さい薄肉大径管においてはエッジのシワに起因する溶接不良を防止す

\* 技術研究所知多研究室主任研究員  
\*\*\* 技術研究所知多研究室室長  
\*\*\*\*\* 知多製造所第1造管部溶接管技術室  
(昭和55年9月18日原稿受付)

\*\* 技術研究所知多研究室  
\*\*\*\* 知多製造所第1造管部大中径管課掛長  
\*\*\*\*\* 知多製造所企画部企画開発室主査(掛長待遇)

るため最適成形条件の把握がぜひとも必要になってくる。

しかしながら成形条件の選択管理にあたっては、通常巨視的な寸法形状変化をもとに経験的技術と勘に依存せざるを得ない場合が多く、必ずしも十分とはいえないのが現状である。この大きな理由としてロールフォーミングによる連続成形においてはプレス成形と異なり、成形材各部が連続的に複雑な三次元的変形を受けるためその理論的解析もきわめて困難であり、成形挙動の微視的解明にまでいたっていないことが挙げられる。

そこで本26インチ電縫鋼管ミルにおけるケージロール成形の基礎的知見を得ることを目的に、

- (1) 成形過程中的材料の変形挙動
- (2) フィンパス、スクイズロール成形荷重などについて調査、検討を行ったのでその結果を報告する。

## 2. 実験方法

### 2.1 ひずみ履歴測定法

26インチ電縫鋼管ミルロール配列の概略をFig. 1に示す。ひずみ変化の測定にあたっては、ダウンヒル開始からスクイズロール成形にいたるまでを連続的に把握することが望ましいが、成形材とロールとの接触によるひずみゲージ破損を考慮して、ピンチロールからエッジフォーミングロールまで

とエッジフォーミングロールからスクイズロールまでの2区間に分割し、それぞれの区域における相対ひずみ変化を測定した。

ひずみゲージは共和電業製KFC型(ゲージ寸法10長×3幅mm、ベース寸法16長×5幅mm)であり、Fig. 2に示すように成形材コイルのエッジ、センターおよびエッジ板厚端面にはりつけた。なおセンターに関してはNo.2~4ブレイクダウン

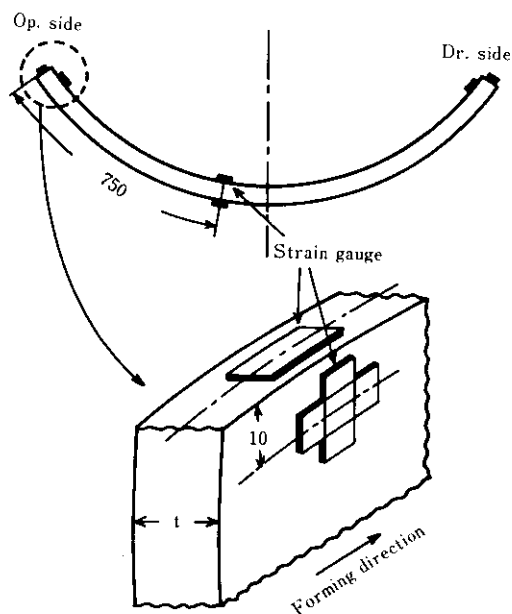


Fig. 2 Strain gauge position on the surface of sheet material

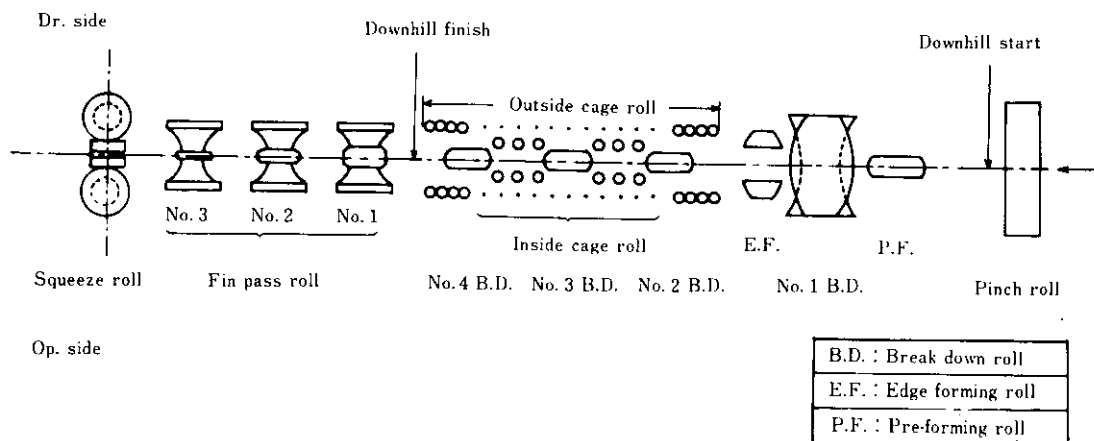


Fig. 1 Layout of 26inch cage forming ERW mill

ロールとの接触を避けるために、ややオペレーター側に寄せたところで測定した。またエッジ端面に関しては曲げの中立軸近傍(板厚中央部に近似)にひずみゲージをはりつけ、曲げひずみ成分によるゲージ抵抗変化の総和をゼロとみなすことにより、エッジの長手方向膜ひずみを推測した。

Table 1 に供試材(管サイズ 24in.φ×6.35mmt, 管規格 API 5LX X60)の化学成分, 機械的性質の明細を, Table 2 に各ロールスタンド間での外周長測定による成形条件を示す。

## 2.2 投影軌跡測定法

Fig. 3 に示すような成形曲げ加工において、エッジとセンターのたどる軌跡変化および成形フラワーを明らかにするために  $\overline{AC}$  間の距離,  $\overline{ABC}$  間各位置におけるベースラインからの高さなどを測定した。

## 2.3 成形荷重測定法

フィンパスおよびスクイズロールスタンドにおけるひずみゲージはりつけ位置をそれぞれ Fig. 4, 5 に示す。ひずみゲージは上述したものと同一であ

Table 2 Forming conditions on the transverse length of sheet along the outside surface

| Measured positions |            | Transverse length (mm) | Reduction (%) |
|--------------------|------------|------------------------|---------------|
| P.F.               | Entry side | 1927.3                 | -0.89         |
| No.1 F.P.          | Entry side | 1944.5                 |               |
|                    | Exit side  | 1926.5                 |               |
| No.2 F.P.          | Exit side  | 1923.0                 | 0.18          |
| No.3 F.P.          | Exit side  | 1923.1                 | ≒ 0           |
| S.Q.               | Exit side  | 1922.0                 |               |

P.F.: Pre-forming roll, F.P.: Fin pass roll  
S.Q.: Squeeze roll

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of hot-rolled sheet

| Grade       | Pipe size     | Chemical composition (wt %) |      |      |       |       |       |       |       | Mechanical properties          |                               |            |
|-------------|---------------|-----------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|-------------------------------|------------|
|             |               | C                           | Si   | Mn   | P     | S     | Al    | Nb    | V     | Y.S.*<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | T.S.<br>(kg/mm <sup>2</sup> ) | El.<br>(%) |
| API 5LX X60 | 24in.φ×6.35mm | 0.07                        | 0.21 | 1.09 | 0.018 | 0.003 | 0.026 | 0.027 | 0.031 | 54.7                           | 59.8                          | 33.2       |

(\* : At 0.5% total strain)

Y.S.: Yield strength, T.S.: Tensile strength, El.: Elongation

り、オペレーター側、ドライブ側おのおののロール支持シャフトに 2~3 箇所はりつけ、各種サイズ、グレードの造管時における成形荷重を測定した。なお後述するひずみまたは荷重測定値は、オペレーター側およびドライブ側のいずれかまたはその平均値を用いた。

## 3. 実験結果

### 3.1 成形過程中的ひずみ変化

#### 3.1.1 ピンチロールからエッジフォーミングロールまで

Fig. 6 に内表面側エッジとセンターにおける長手方向表面ひずみ  $e_x$  および幅方向表面ひずみ  $e_y$  を示す。まずエッジ長手方向については引張ひずみが漸増し、プリフォーミングロール出側の No.5 ディッシュロールと No.1 ブレイクダウンロールの

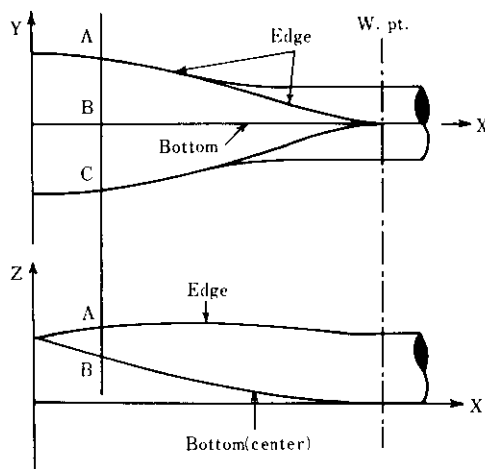


Fig. 3 Plan and side views of plate deformation in pipe forming process

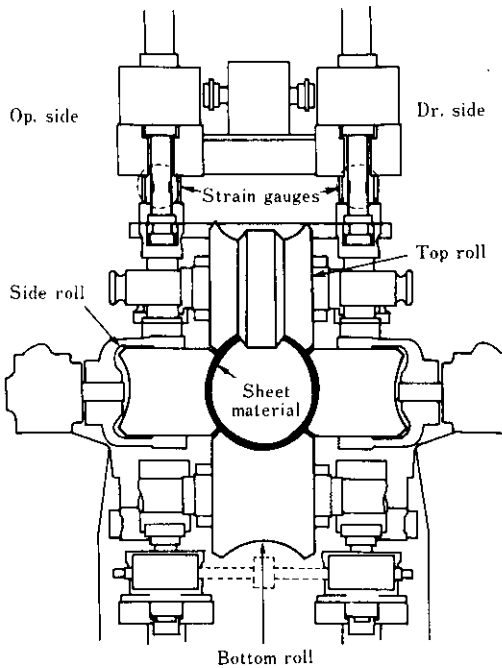


Fig. 4 Strain gauge position for measuring forming load in No. 1 fin pass top roll

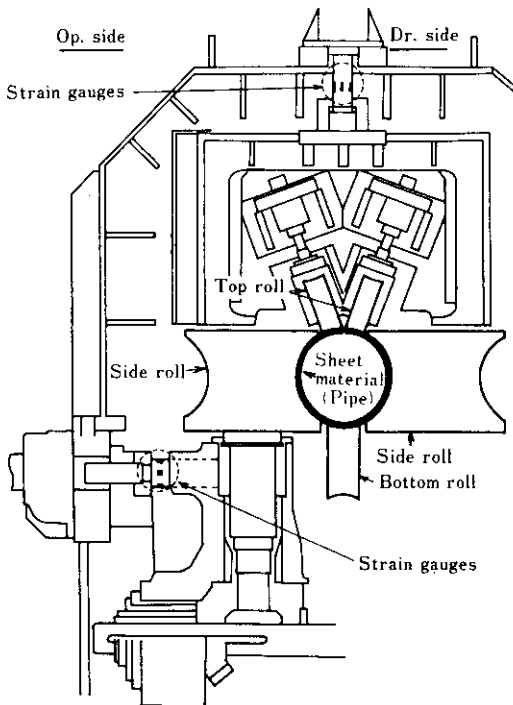


Fig. 5 Strain gauge position for measuring forming load in squeeze side and top rolls

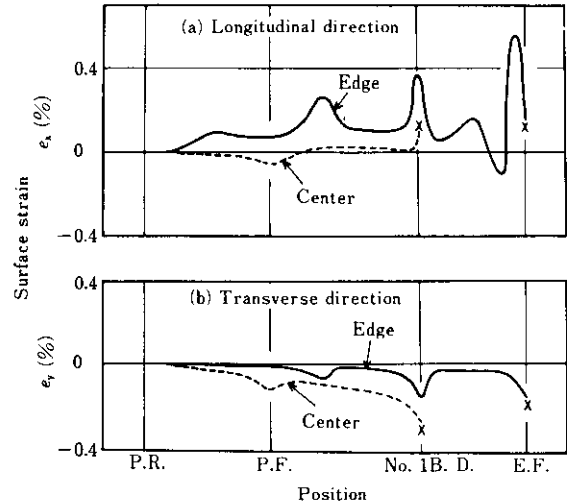


Fig. 6 Transition in the surface strain from pre-forming to edge forming

ところで約0.3~0.4%のひずみのピークが生じている。さらにNo.1ブレイクダウンロール通過後再び約0.2%の引張りひずみを受けたあと圧縮変形に転じ、エッジフォーミングロール進入につれて約0.6%の急激な引張りひずみを受けている。

このような複雑なひずみ変化は後述するNo.1フィンパスロールへの進入過程における成形挙動ともよく一致しており、成形材のロールへのなじみによる曲げ-曲げもどし変形に起因しているものと考えられる。

エッジ幅方向ひずみは長手方向ひずみ変化に対応して圧縮側にピークが現われているが、エッジフォーミングロール前まではエッジの曲げ加工が行われなかったため、たかだか弾性範囲内の小さな圧縮ひずみが生じるだけである。

センターひずみに関しては長手方向へはほとんど変化が認められずほぼゼロであり、幅方向へはわずかずつの曲げ加工を受けることによって圧縮ひずみの漸増が認められる。

### 3・1・2 エッジフォーミングロールからスクイズロールまで

Fig. 7に長手方向相対ひずみ変化を、Photo. 1, 2にそれぞれケージゾーン内部およびNo.1フィンパスロール進入時のエッジ近辺の成形状況を示す。ケージゾーン内ではエッジおよびセンターとも

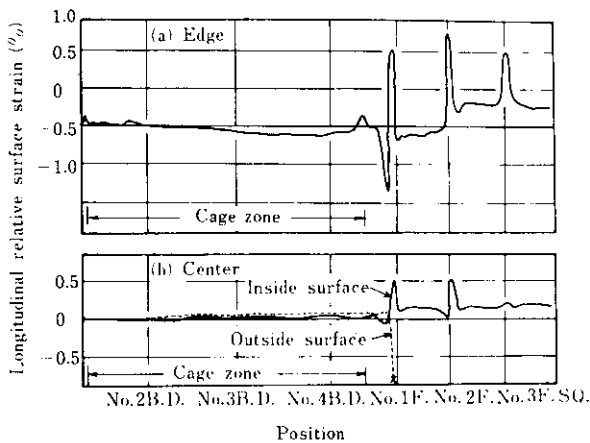


Fig. 7 Transition in the longitudinal surface strain in cage and fin pass forming

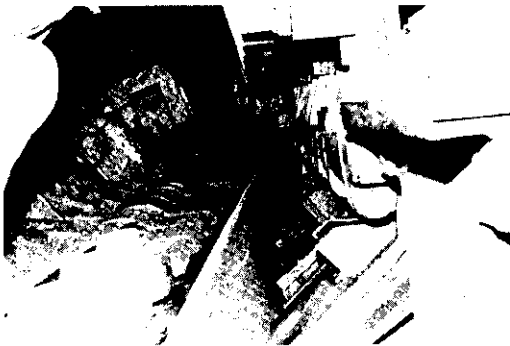


Photo. 1 View of sheet edge in the cage forming zone

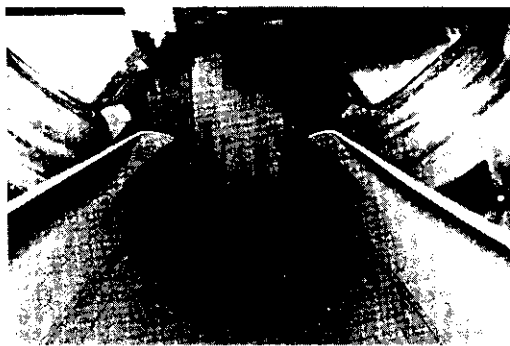


Photo. 2 View of sheet edge at the entry side of No. 1 fin pass roll

長手方向ひずみ変化は少なく、エッジでははじめにやや引張変形を受けた後ゆるやかに圧縮変形に移行するのに対し、センターではわずかながら引

張ひずみの漸増が認められる。

さらに成形が進み最終ケージロールによる拘束から解放される付近から No.1 フィンパスロールへ進入する際に、エッジ長手方向ではいったんわずかに引張変形を受けた後かなり大きな圧縮変形を受ける点が注目される (Photo. 2 参照)。またフィンパスロール通過前後で急激な引張-圧縮変形を受けながら成形が進行している。

このようなロール進入時における急激なひずみ変動については広幅断面材<sup>8,9)</sup>、円弧形<sup>10)</sup>、V 形断面材<sup>11)</sup> などの変形においてもいくつかの測定報告例があり、

- (1) ロール直下前後におけるロールへのなじみによる成形材の曲げ-曲げ戻し変形、
  - (2) 成形材各部 (たとえばエッジとセンター) での空間的軌跡長差にもとづく長手方向への圧縮、引張変形、
  - (3) 成形材の移動に伴う方向変化によって生じる力の分布差にもとづく変形、
- などの成形要因が重複して発生しているものと考えられる。

したがってエッジの急激な圧縮変形の適正化をはかり、エッジバックリング現象を防止するうえでフィンパスロール成形はきわめて重要な成形域といえる。

Fig. 8 にセンターでの幅方向相対ひずみ変化を示す。ケージゾーン内では No.2 ブレイクダウンロール付近で内外面側の圧縮、引張ひずみとも急増した後はわずかに漸増するのみで、ひき続きフィンパスロールにおいて曲げ絞り成形に応じた圧縮変形を受ける。

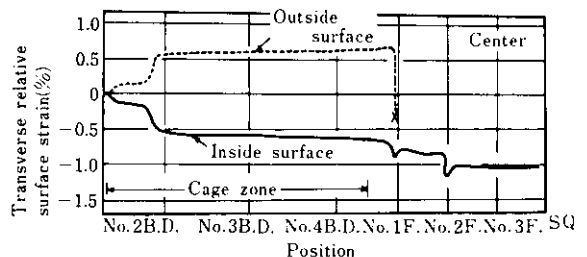


Fig. 8 Transition in the transverse surface strain in cage and fin pass forming

### 3・2 成形過程中的形状変化

Fig. 9 に No.1 フィンバスロール進入前までの成形過程中的エッジとセンターの投影軌跡変化(投影幅および投影高さ)を示す。ボトムラインは  $0.8 \times \text{O.D.}$  (=Outside Diameter) のダウンヒル量に相当する下降を示すのに対し、エッジラインはケ

ージゾーン中 No.2 と No.3 ブレイクダウンロール中間域にいたるまで次第に上昇し ( $\Delta H_{\max} \cong 0.5 \times \text{O.D.}$ )、以後わずかな下降しフィンバスロール成形へと移行していく。この過程における任意位置での成形断面形状変化(フラワー)測定結果を Fig. 10 に示す。

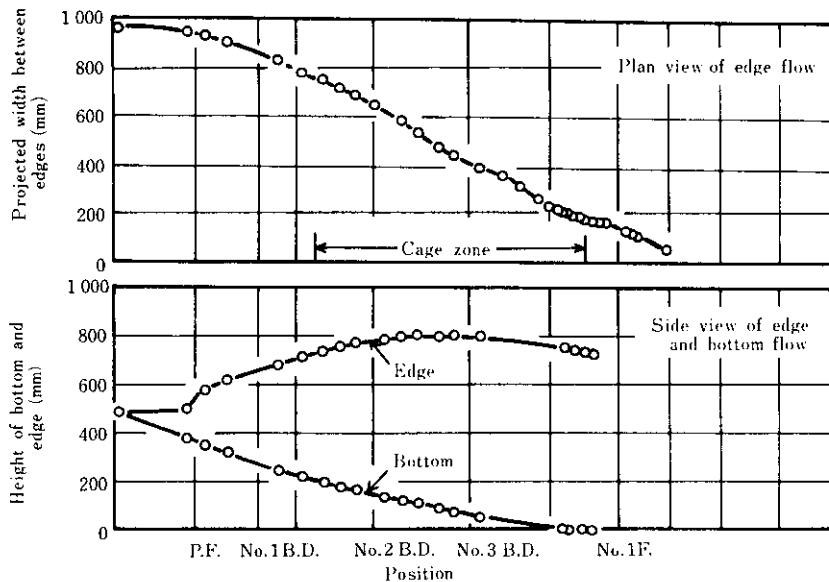


Fig. 9 Edge and center traces in pipe forming process

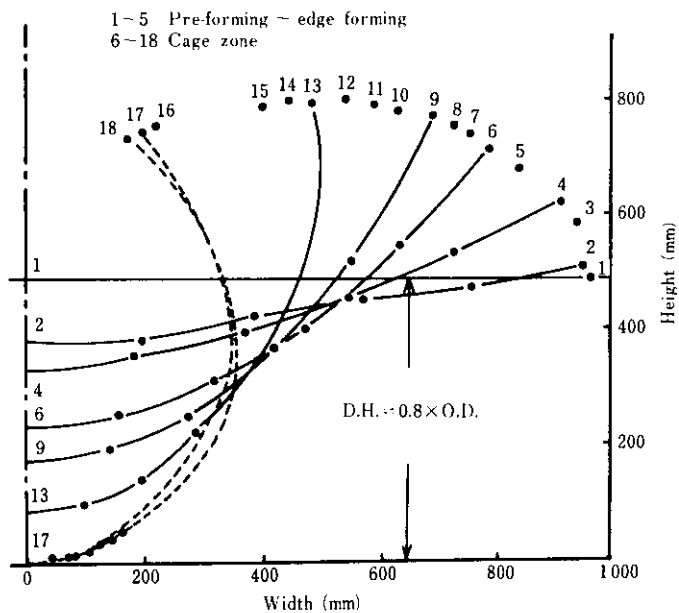


Fig. 10 Forming flower in the case of  $0.8 \times \text{O.D.}$  downhill height

### 3.3 成形荷重測定結果

Fig. 11 に No.1 フィンパストップロール、スクイズサイドロール、スクイズトップロールにおける成形荷重と  $\sigma_y \cdot t$  ( $\sigma_y$ : 素材の降伏強度,  $t$ : 板厚) の関係を示す。成形荷重は  $\sigma_y \cdot t$  とともに増大する傾向にあるが、かなりバラツキを有しており、このことは後述するようにフィンパス絞り量 ( $\Delta l_F$ )、スクイズアップセット量 ( $\Delta l_S$ ) によっても著しく影響を受けるためである。

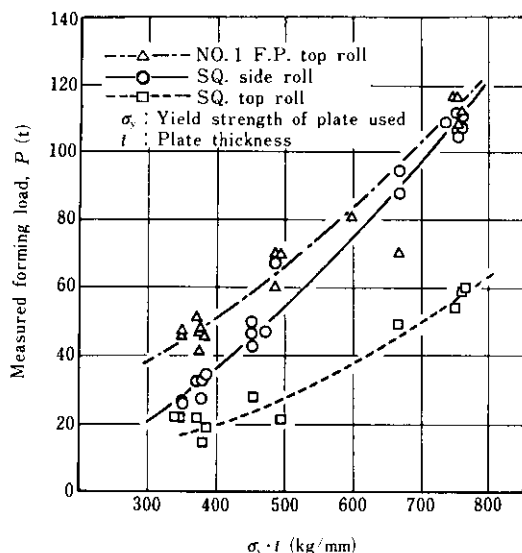


Fig. 11 Effect of  $\sigma_y \cdot t$  on the forming load in No. 1 fin pass roll and squeeze roll

## 4. 考 察

### 4.1 ケージロール成形について

成形過程中的エッジとセンターの軌跡長差を減少し、エッジバックリング現象を防止するためにはダウンヒル成形が推奨され、これまでに各種の実験、検討が報告されている<sup>12-20)</sup>。このダウンヒル量最適値については、成形ミルのロールカリバー、ロールスタンド間隔、ロール数などによって変化するためまちまちに報告されているが<sup>13,14,17,18)</sup>、一般には過大なダウンヒル成形は逆にエッジバックリングを助長し、逆効果になるといわれている。

Fig. 12 にエッジおよびセンターでのケージロール成形域における長手方向相対膜ひずみ変化を示す。エッジ長手方向には漸次圧縮ひずみが加わっており、このことはダウンヒル成形の効果に加えて、多数のケージロールにより外側から拘束されるためにエッジストレッチが極力おさえられ、圧縮ひずみとして吸収されているものと考えられる。

またセンター長手方向ではエッジとは逆に漸次伸びひずみが加わっており、このことは馬場<sup>15)</sup>、生田目<sup>16)</sup>らの提案している中央延伸法(成形材の中央を伸ばし、エッジとセンターの相対ひずみ差を少なくする方法)と同様の効果が生じているものと考えられる。

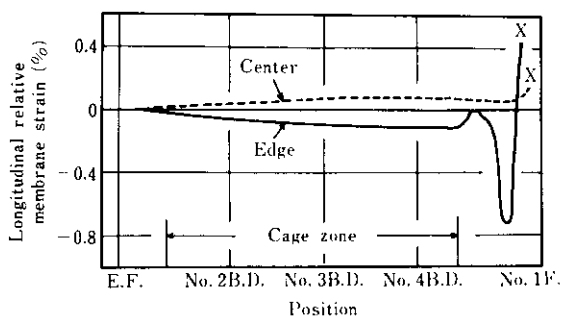


Fig. 12 Transition in the longitudinal relative membrane strain in cage forming process

Fig. 13 に通常の孔形ロールミル (Mckay 20 インチミル) と本ケージロールミル (IHI-Yoder 26 インチミル) において、管サイズ 18in.  $\phi \times 7.92$ mm (X-52) 成形造管時のエッジ長手方向相対ひずみ変化を比較して示す。通常のブレイクダウンロール成形においてはロール進入前後に急激な引張-圧縮変形が認められ、エッジストレッチの増大が予想されるが、ケージロール成形ではわずかなひずみ変化を示すのみであることからその有効性が予測される。

しかしながら成形が進み最終ケージロールによる拘束から解放される付近から No.1 フィンパストロールへ進入する際、エッジ長手方向ではいったんわずかに引張変形を受けた後、かなり大きな圧縮変形を受ける点が注目される。同様の現象はエッジフォーミングロール入側においても認められる。このことは中島、水谷ら<sup>20)</sup>が述べているよう

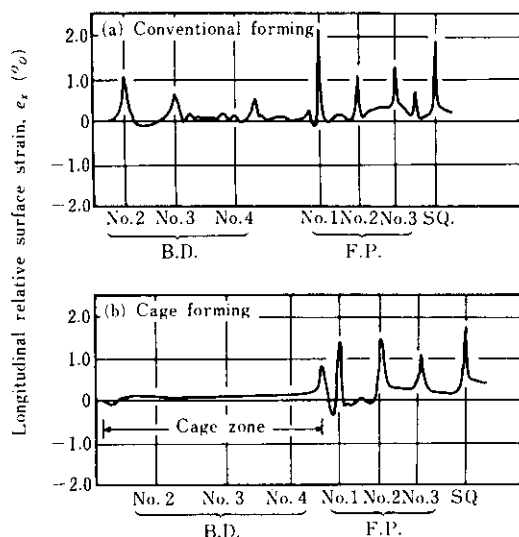


Fig. 13 Comparison of longitudinal surface strain at the sheet edge between conventional and cage forming processes (18 in.  $\phi \times 7.92$ mm, X-52)

に、エッジストレッチが圧縮ひずみに変化する点では効果的であるが、圧縮応力状態が挫屈限界を越えた場合にはエッジバックリングが発生する可能性もあり、圧縮変形状態の適正管理がきわめて重要と考えられる（ただし本ケージロール成形ではエッジフォーミングロールによりエッジ近辺で強い曲げ加工が行われ剛性増大がはかられており、エッジバックリング防止に役立てられている）。

#### 4.2 フィンパスロール成形について

フィンパス成形においては適切なロール設定、絞り量を選択することがエッジバックリング防止の面からのみならず、スクイズロール溶接過程における安定したV形状とエッジ端面形状を得るうえできわめて重要である。しかしながらフィンパス成形域では複雑な応力状態を呈し、また測定手法上の問題もあって研究報告も少なく成形挙動も不明な点が多い。そこで本実験で得られたひずみ履歴測定結果をもとに若干考察を行った。

Fig. 14にフィンパス成形におけるエッジひずみ変化の模式図を示す。いまフィンパストップロールスロート半径  $R$  ( $=300$ mm) に沿った長手方向曲げ

ひずみは計算によれば  $\epsilon_{xb} = t/(2R+t) = 1.05\%$  ( $t = 6.35$ mm) となり、実測表面ひずみ  $\epsilon_x \approx 1.10\%$  (Fig. 7 参照) とよく近似している。このことからフィンパスロール進入時の急激な引張-圧縮変形は Fig. 14に示すようにフィンパストップロールのスロート部へのなじみによる曲げ-曲げもどしひずみの発生が主要因となり、わずかではあるがフィンパス絞り成形による付加的膜ひずみが加わったものといえることができる。

次にセンター幅方向表面ひずみ変化 (Fig. 8 参照) についてみると、No.1 フィンパスロール前後で約 0.12%、No.2 フィンパスロール前後で約 0.23% の絞り変形が加えられている。いっぽう、それぞれの外周長変化による絞り量 0.93% (No.1 F)、0.18% (No.2 F) と対比すると、センター幅方向表面ひずみ変化による絞り量は No.2 フィンパスロール成形のほうが大きい、外周長変化による絞り量では見かけ上 No.1 フィンパスロール成形のほうがはるかに大きくなっている（なお本実験においては No.3 フィンパスロールによる絞り成形はきわめて小さい）。

いまフィンパスボトムロールのカリバーから求めた No.1~2 フィンパスロール間の曲げひずみの差  $\Delta\epsilon_{yb}$  は 0.05% であることから、実測内表面ひ

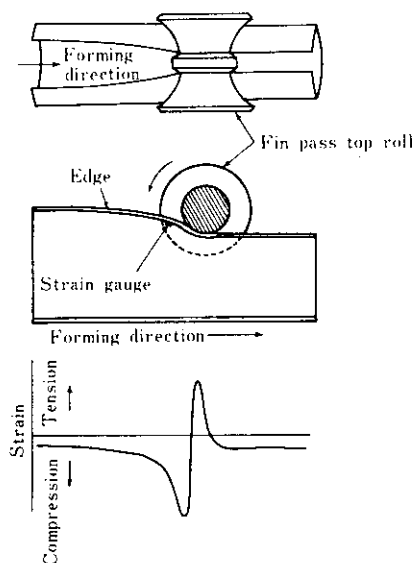


Fig. 14 Shape and strain of the sheet edge during fin pass rolling

ずみ(曲げひずみ+膜ひずみ)の差0.23%のうち0.18%がNo.2フィンパスロールで加わる圧縮膜ひずみ(実質絞り率)ということになり、外周長基準絞り率(=0.18%)とよく一致している。

Fig. 15に標点法および板厚変化から求めたフィンパス成形前後におけるエッジ周辺の長手方向( $\epsilon_l$ )、幅方向( $\epsilon_c$ )、板厚方向( $\epsilon_t$ )ひずみ分布を示す。各ひずみの間にはほぼ体積一定( $\epsilon_l + \epsilon_c + \epsilon_t = 0$ )の関係がなりたち、その変形割合は種々の拘束条件、圧下状態および板材の材質形状によって異なるが、とくにエッジ周辺においてはほとんど板厚増肉変形が主体となっている。なお増肉による伸びひずみがエッジより約10mm付近に最大値を有し、エッジ端面付近の増肉傾向が少ないのは、サイドトリミングによるエッジダレおよびフィン面での拘束などの影響によるものと推定される。

したがってこれらのことからNo.1フィンパスロールによる絞り変形はほとんどエッジ周辺に集中し、エッジ板厚の増大に寄与しているのに対し、成形が進行し真円形状に近づきロールカリバー形状になじみやすくなったNo.2フィンパスロールでは円周方向にほぼ均等な拘束を受けて均一な圧縮変形が加わっているものと考えられる。すなわちこのことは木内ら<sup>21)</sup>が述べているように、フィン

幅およびフィン角度が大きい上流側フィンパス成形においては、エッジに加わる力は半径方向よりも円周方向が大きく、この場合には板厚の増加もエッジに局部的に集中する傾向とよく一致している。またこのようにNo.1フィンパス絞り量を大きくとることによってエッジを増肉させることは、エッジバックリングを板厚方向に吸収させるのみならず、座屈抵抗を大きくする意味でエッジバックリング防止に有効であり、このことは小野田ら<sup>22)</sup>のケージロールモデルミル実験結果および馬場<sup>15)</sup>の報告ともよく一致している。

#### 4.3 成形荷重について

フィンパス、スクイズロール成形のような管周方向に圧下力が加えられる場合の成形荷重は、ロール配列、ロールカリバー、ロール径、成形材の円弧形状などによって相互に複雑な影響を受けるばかりでなく、タンデム成形下において定常、非定常状態によって挙動を異にし<sup>23)</sup>、その解析もかなり困難とされている。

中島、水谷ら<sup>12,24)</sup>はロール形状を単純化しFig. 16に示す2ロール型真円フィンパスロールにおいて成形材外周長がロール軸方向に平行なロール断面周長と一致する点から管円周方向に圧縮力が作用する範囲の管長手方向距離を $l$ として(1)式を導き出している。

$$l = 2R_0 \sqrt{(a/R_0 - 1)r} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $R_0$  : 出側管半径

$a$  : ロールフランジ半径

$r$  : フィンパス絞り量

(1)式を書きなおすと、

$$l = \sqrt{2R_1/\pi} \cdot \sqrt{\Delta l_c} \quad \dots\dots\dots (1)'$$

で表わされる。

ここで、 $R_1$  : ロールボトム半径

$\Delta l_c$  : フィンパスまたはスクイズロールでの絞り量

いま単位長さあたりの成形力 $F$ はロール角度を $2\theta$ とすれば、

$$F = 2\sigma_y \cdot t \cdot \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

であり<sup>25)</sup>、ロールに加わる圧縮成形荷重 $P = l \cdot F$ は(1)', (2)式より(3)式で表わされる。

$$P = 2\sigma_y \cdot t \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{2R_1/\pi} \cdot \sqrt{\Delta l_c} \quad \dots\dots (3)$$

(なおここでは2ロール以上の複数ロールからな

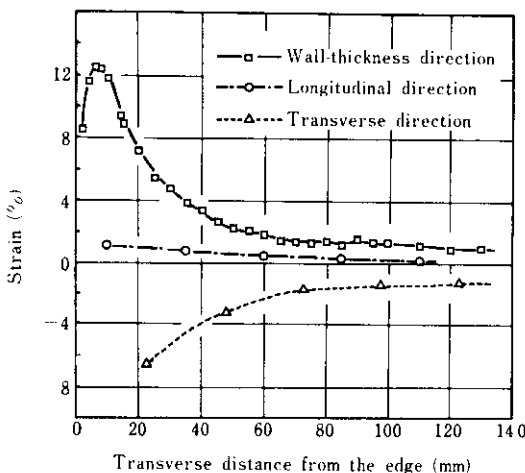


Fig. 15 Strain distribution in triaxial directions in the vicinity of sheet edge caused by fin pass roll forming

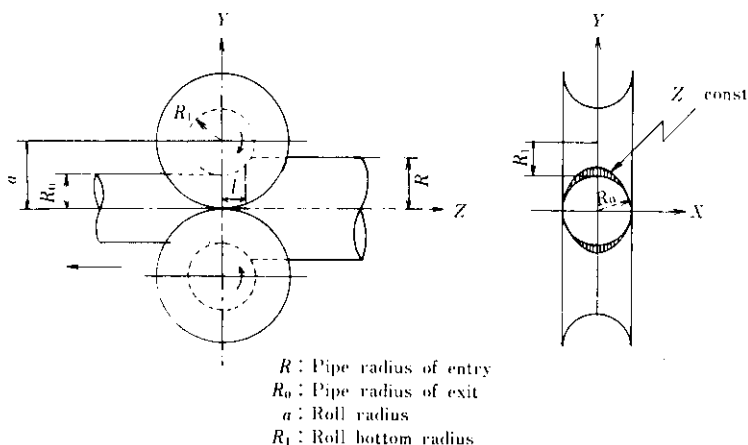


Fig. 16 Schematic diagram of contacting area on the outside surface of pipe reduced by two rolls <sup>24)</sup>

るフィンパス、スクイズロールにおいても(1)'式が近似的になりたつものと仮定した)。

ところで  $\Delta l_C = 0$  のとき実際の成形荷重はゼロではないことが実操業において経験的にもよく知られている。これは入側の管が真円形でないため曲げ成形が必要なためである。この曲げ成形に要する力 ( $P_B$ ) については各種の実験解析<sup>26~29)</sup> がなされているが、中島、水谷<sup>28,29)</sup> はブレイクダウン曲げ成形において  $P_B$  は板厚の2乗に比例することを実験的に確認しており、

$$P_B = \alpha \cdot \sigma_y \cdot t^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

なる荷重式を提唱している。ここで  $\alpha$  はロール形状、成形材の曲げ形状、材質などによって変化する定数であり、荷重修正係数と一般に称されている。

以上のことから実際の成形に必要な荷重は圧縮成形と曲げ成形の和として(3), (4)式より(5)式で表わすことができる。

$$P = 2\sigma_y \cdot t \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{2R_1/\pi} \cdot \sqrt{\Delta l_C} + \alpha \cdot \sigma_y \cdot t^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

いま  $\Delta l_C = \Delta l_F$  (No.1 フィンパス外周絞り量),  $\Delta l_C = \Delta l_S$  (スクイズロールアブセット量) としたとき, No.1 フィンパストップロールおよびスクイズサイドロールの実測荷重とパラメーター  $t \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{\Delta l_C}$  の関係をそれぞれ Fig. 17, 18 に示す。成形荷重とこのパラメーターの間には強い相関関係が認められることから(5)式右辺の各定数項を重回帰分析により求めたところ(6), (7)式のような計算

式(単位:t)が得られた。

(1) No.1 フィンパストロール

$$P_{cal} = 2.46 \times 10^{-2} \sigma_y \cdot t \cdot \sqrt{\Delta l_F} + 4.27 \times 10^{-3} \sigma_y \cdot t^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

(2) スクイズサイドロール

$$P_{cal} = 2.71 \times 10^{-2} \sigma_y \cdot t \cdot \sqrt{\Delta l_S} + 5.56 \times 10^{-3} \sigma_y \cdot t^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 19, 20 にこれらの成形荷重の実測値と計算値の関係を示すが、若干のバラツキを有するものの両者はよく対応していることがわかる。また(5)式において実機26インチミルの  $R_1$ ,  $\theta$  の値は各サイズ共通で、No.1 フィンパストロール

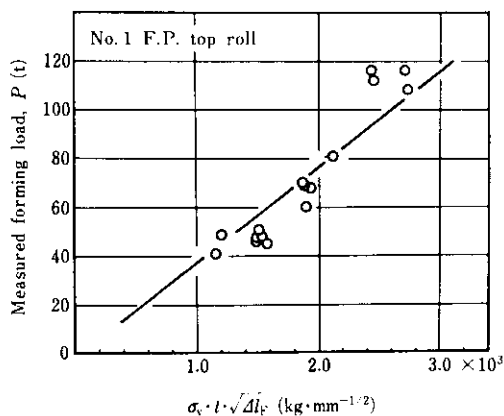


Fig. 17 Effect of a parameter,  $\sigma_y \cdot t \cdot \sqrt{\Delta l_F}$ , on the forming load in No. 1 fin pass top roll

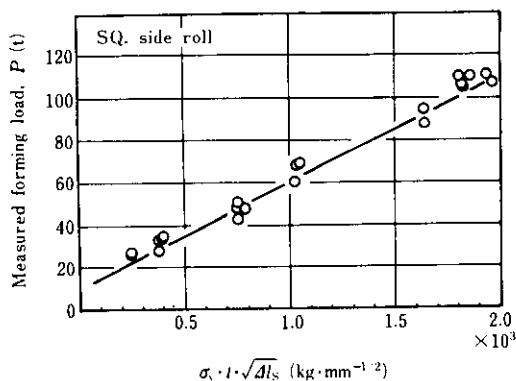


Fig. 18 Effect of a parameter,  $\sigma_y \cdot t \cdot \sqrt{\Delta l_s}$ , on the forming load in squeeze side roll

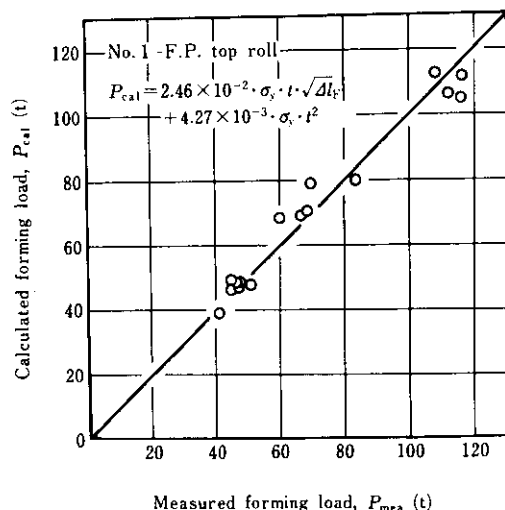


Fig. 19 Comparison between measured and calculated forming loads in No. 1 fin pass top roll

( $R_1 = 300\text{mm}$ ,  $\theta = 50^\circ$ ), スクイズサイドロール ( $R_1 = 300\text{mm}$ ,  $\theta = 70^\circ$ ) であることから定数項 ( $= 2 \sin \theta \sqrt{2R_1/\pi}$ ), 理論値はそれぞれ  $2.12 \times 10^{-2}$ ,  $2.60 \times 10^{-2}$  となり (6), (7) 式で得られた実験式右辺第一項の定数とよく一致していた。このことから本解析では 2 ロールによる楕円近似を 4~5 ロールにまで拡大近似したにもかかわらず, (5) 式はフィンパス, スクイズロール荷重特性に関するほぼ妥当な評価式とみなすことができる。

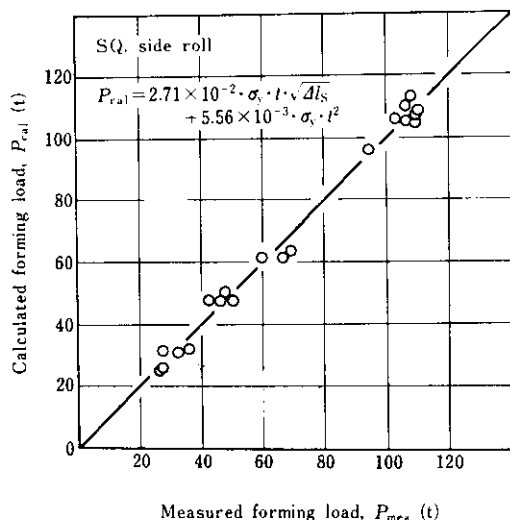


Fig. 20 Comparison between measured and calculated forming loads in squeeze side roll

Fig. 21 にスクイズトップロール成形荷重と  $\sigma_y \cdot t^2$  の関係を示すが両者の間にはほぼ直線関係がなりたつ。すなわちスクイズトップロールはその形状, 使用方法からも明らかなようにスクイズサイドロールやフィンパスロールのような管周絞り成形よりも成形材のエッジ近辺の曲げ成形に寄与しているものと推測される。

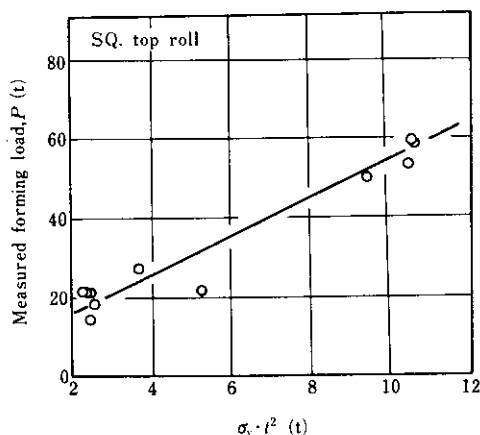


Fig. 21 Effect of a parameter,  $\sigma_y \cdot t^2$ , on the forming load in squeeze top roll

## 5. 総 括

ケージロール方式による26インチ電縫鋼管ミルの成形特性を明らかにするために成形過程中的材料の変形挙動（ひずみ履歴、投影軌跡）およびフィンパス、スクイズロール成形荷重について調査、検討したところ以下の結論を得た。

- (1) 成形過程中的の表面ひずみ変化を24in.φ×6.35tmm (X-60)について調査したところ、とくにエッジ長手方向ではロール進入前後に急激な引張-圧縮変形を受け、この量はロールへのなじみによる曲げ-曲げもどしひずみとほぼ一致する。
- (2) 通常の孔型ロールブレイクダウン成形にくらべると、ケージロール成形ではケージゾーン内の相対ひずみ変化はきわめて小さくかつ滑らかな変化を示す。
- (3) エッジ長手方向ひずみはケージゾーン内では圧縮ひずみが漸増するが、以後No.1フィンパスロールに進入する直前でやや大きな引張-圧縮変形を受ける。
- (4) 外周長変化による絞り量は見かけ上No.1フィンパスロール成形のほうがはるかに大きい、センター幅方向表面ひずみ変化による絞り量はNo.2フィンパスロール成形のほうが大きい。この原因として、No.1フィンパスロール絞り変形はほとんどエッジ周辺に集中しエッジ増肉に寄与するのに対し、No.2フィンパスロール絞り変形は円周方向

にほぼ均等に加わっているためと推察される。

- (5) エッジの増肉は約10mm付近に最大値を示し各方向ひずみの間にはほぼ体積一定( $\epsilon_1 + \epsilon_c + \epsilon_t = 0$ )なる関係が認められる。

- (6) 成形過程中的のエッジとセンターの投影高さ変化を調査したところセンター（ボトムライン）はダウンヒル量 $0.8 \times O.D.$ に相当する下降を示すのに対し、エッジラインはケージゾーン中 $\Delta H_{\max} \cong 0.5 \times O.D.$ まで上昇し、以後わずかな下降しながらフィンパス成形へと移行する。

- (7) フィンパス、スクイズロール成形荷重は管周方向圧縮に要する力と曲げ成形に要する力の和として近似的に次式で表わされる。

$$P = 2\sigma_y \cdot t \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{2R_1/\pi} \cdot \sqrt{\Delta l_C} + \alpha \cdot \sigma_y \cdot t^2$$

- (8) 重回帰分析による成形荷重実験式として

No.1 フィンパスロールでは

$$P_{cal} = 2.46 \times 10^{-2} \sigma_y \cdot t \cdot \sqrt{\Delta l_F} + 4.27 \times 10^{-3} \sigma_y \cdot t^2$$

スクイズサイドロールでは

$$P_{cal} = 2.71 \times 10^{-2} \sigma_y \cdot t \cdot \sqrt{\Delta l_S} + 5.56 \times 10^{-3} \sigma_y \cdot t^2$$

で表わされ、これらの右辺第一項定数値は理論値( $= 2 \sin \theta \cdot \sqrt{2R_1/\pi}$ )ともかなりよく一致していた。

本研究にあたり、山梨大学工学部精密工学科小野田助教授よりモデルミルケージロール成形の観点から有益なご教示を賜わり深く感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 田村, 細川, 吉本, 大出, 近藤, 黒崎, 杉本: 川崎製鉄技報, 11 (1979) 3, 143
- 2) 本城, 中村, 磯部: 石川島播磨技報, 19 (1979) 1, 1
- 3) 本城, 中村, 磯部: 石川島播磨技報, 19 (1979) 2, 67
- 4) 権藤, 芳賀, 青木, 佐藤, 桜井, 山田: 製鉄研究, (1979) 297, 84
- 5) 横山, 山県, 嘉納, 渡辺: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 1, 23
- 6) 村木, 野上, 田中, 高松, 森, 杉井: 製鉄研究, (1973) 277, 25
- 7) 菊島, 中村, 福沢, 矢田: 石川島播磨技報, 18 (1978) 5, 405
- 8) 小野田, 小門, 藤原, 斎藤: 塑性と加工, 20 (1979) 222, 601
- 9) 鈴木, 木内, 新谷, 三浦: 塑性と加工, 18 (1977) 196, 365
- 10) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 塑性と加工, 11 (1970) 112, 315
- 11) 斎藤, 藤田, 加藤: 塑性と加工, 13 (1972) 143, 907
- 12) 中島, 水谷, 菊間, 松本: 鉄と鋼, 59 (1973) 9, A 125
- 13) 中島, 水谷, 笹平, 白石, 恩田: 製鉄研究, (1979) 299, 108

- 14) 生嶋, 三原, 田中, 鈴木: 鉄と鋼第 95 回講演大会, 64 (1978) 4, 269
- 15) 馬場: 住友金属, 15 (1963) 2, 19
- 16) 生田目: 塑性と加工, 8 (1967) 82, 591
- 17) 東, 鳥井, 秋山: 第 57 回塑性加工シンポジウム講演論文, (1976) 64
- 18) H. Gross: Herstellung von Rohren, Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Verlag stahleisen M.B.H. Düsseldorf, (1975) 80
- 19) D. Anderson and P. Mackinnon: Technical Report of the Steel Company of Canada, (1973) 204
- 20) 中島, 水谷, 菊間, 西海, 横田: 昭和 51 年度塑性加工春季講演会, (1976) 285
- 21) 木内, 新谷, 江藤: 昭和 55 年度塑性加工春季講演会, (1980) 287
- 22) 小野田, 植松, 宮沢, 横山, 江島, 田村: 第 31 回塑性加工連合講演会論文集, (1980) 234
- 23) 小野田, 植松, 宮沢, 豊岡, 阿部, 江島: 第 31 回塑性加工連合講演会論文集, (1980) 235
- 24) 中島, 水谷, 菊間, 松本: 第 23 回塑性加工連合講演会, (1972) 455
- 25) 中島, 水谷, 菊間, 西海, 横田: 昭和 51 年度塑性加工春季講演会, (1976) 281
- 26) 益田, 室田, 神馬, 玉野, 福田: 塑性と加工, 6 (1965) 54, 379
- 27) 鈴木, 木内, 中島, 市田山: 塑性と加工, 11 (1970) 119, 913
- 28) 中島, 水谷, 菊間, 恩田: 第 26 回塑性加工連合講演会, (1975) 11
- 29) 中島, 水谷, 菊間, 恩田: 昭和 51 年度塑性加工春季講演会, (1976) 289