

ユニバーサルミルによるH形鋼圧延の変形機構

新日本製鉄株式会社堺製鉄所

圧延部長 土屋 健 治

1. はじめに

条鋼圧延の特徴は、形状の複雑な形鋼を多品種少量生産することであり、いかに良好な形状の製品を圧延するか主眼が置かれ、その技術は長年にわたる操業技術の蓄積と、現場作業者の技能によって支えられてきた。

また、圧延設備もストリップミルやプレートミルと比較して近代化、自動化が遅れているのが現状である。しかし、近年になって条鋼圧延の分野においても、専用ユニバーサルミルが出現して、H形鋼の大量生産が開始されると、従来の経験的圧延法から、より効率的に生産を達成するための科学的圧延法への脱皮が、強く指向されるようになった。この傾向は、まずH形鋼圧延の最適化という命題から出発して、その後、他の条鋼圧延の分野へかなり急速に拡大しつつある。この中で圧延理論の果す役割はきわめて大きく、他の要因にくらべて、より基礎的であるといえることができる。

さて、圧延加工の理論は、薄板圧延のように、板幅比（板巾/板厚）が大きく、板幅方向の変形が無視できる場合は、平面歪問題として取扱えるため、二次元変形理論が適用される。一方、厚板、分塊圧延のように、板幅比が小さく幅ばりを生じ、板幅方向の変形が無視できないものや、また形鋼圧延のように形状が複雑で、各部分の圧下率が異なり三次元的に変形

し平面歪問題として取扱えないものは、三次元圧延理論を用いなければならない。

しかし、応力や材料流れを三次元的に解明することのできない現段階では、形鋼理論は難解きわまるものである。

そこで、研究はもっぱらプラスチック模型圧延機、または鉛模型圧延機を用いた調査実験、およびオンラインミルについて採取された圧延特性に関する諸データの解析等の方法によって行なわれている。

特に、後者については最近開発整備された線厚み計、フランジ幅計、ロードセル等の検出端を駆使して、正確かつ多量のデータが得られており、解析研究の面で果している役割はきわめて大きいものがある。

以下、これまでに得た研究成果のうち、プラスチック模型圧延実験による基礎的研究についてその概要を紹介する。

2. ユニバーサルミルによるH形鋼圧延の変形機構の特徴

図-1に堺製鉄所大形工場圧延ラインの概要を示す。

加熱炉で加熱された鋼片は、B・Dミル（2 highの孔型）→R₁E₁ミル→R₂E₂ミル（R：

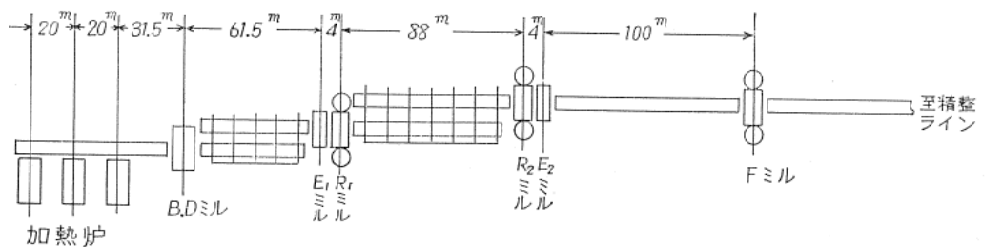


図-1. 大形工場圧延ラインレイアウト (例)

ユニバーサル、E；エッジングミル）→ F ミル（ユニバーサル）の順に圧延され、最終断面であるHの形状に仕上げられる。

特に R_1E_1 , R_2E_2 , F の各ミルは、第1中間圧延機群、第2中間圧延機群、仕上圧延機とよばれ、図-2に示すような圧延方式となっている。すなわち上下2本の水平ロールのほかに、これをはさんでその両側に駆動しない堅ロールを設け、併せて4本のロールによって1つの孔型状態に形成し、それぞれの間隔は運転操作によって自由に調節できる機造となっている。このロールにH形鋼と近似の断面で肉厚が厚い素材を何回も通過させ、通過毎にロール間隔を狭めて圧下を加えていく。すなわち、ウェブ部は上下水平ロールの間で、フランジ部は水平ロールの側面と堅ロールとの間で同時圧下される。

なお、これだけではフランジ先端に圧下を加えられないので、ユニバーサルスタンドに隣接させてエッジングスタンドを設け、フランジの先端に圧下を加えて成形するとともに、フランジ幅の規制を行なう。この間の断面変形状態を図-3に示す。

上に述べたユニバーサルミルにおける変形機構は、上下2本のロールによって厚み方向に均一に圧下される板圧延のそれに比べて、著しく異なり、次のような特徴を有している。

① ウェブとフランジのロール接触開始位置、および圧下率が異なるため、ウェブとフラ

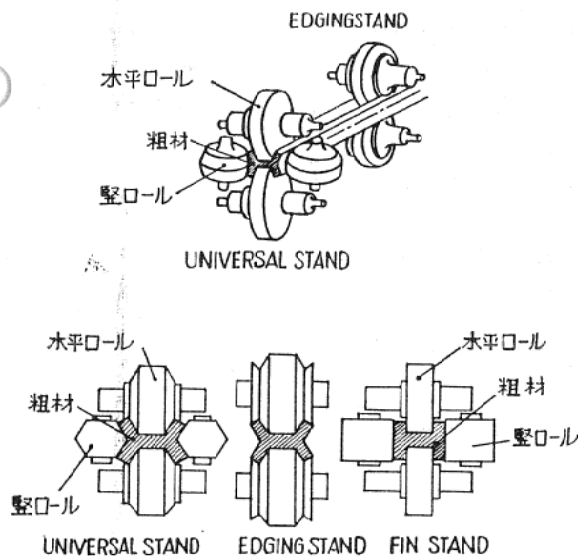


図-2. ユニバーサル圧延方式

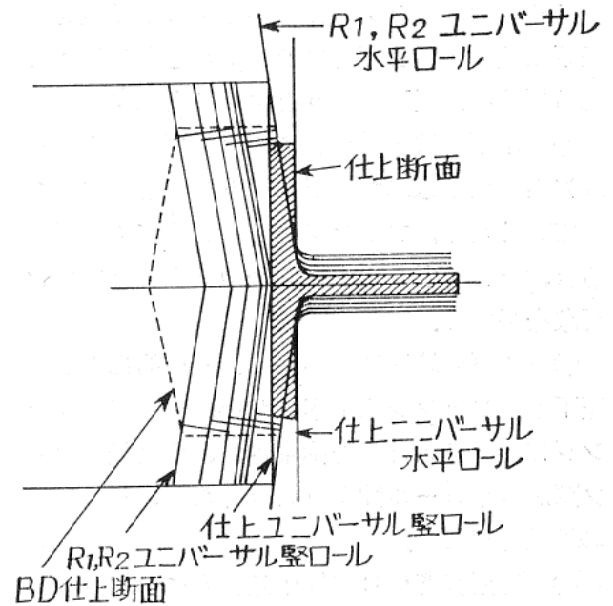


図-3. ユニバーサルミルにおける断面変形の状態

ンジ間で、メタルの授受が行なわれ、しかもフランジ幅方向には全く無拘束なため、メタルフローの自由度は板圧延の場合にくらべて、はるかに大きい。

② ウェブの投影接触長さ L_w と、フランジの投影接触長さの関係は、3で述べるように一般的に $L_f > L_w$ となり、1パスの圧延過程は、フランジだけの単独圧下領域と、ウェブとフランジの同時圧下領域に分けられる。（図-4参照）

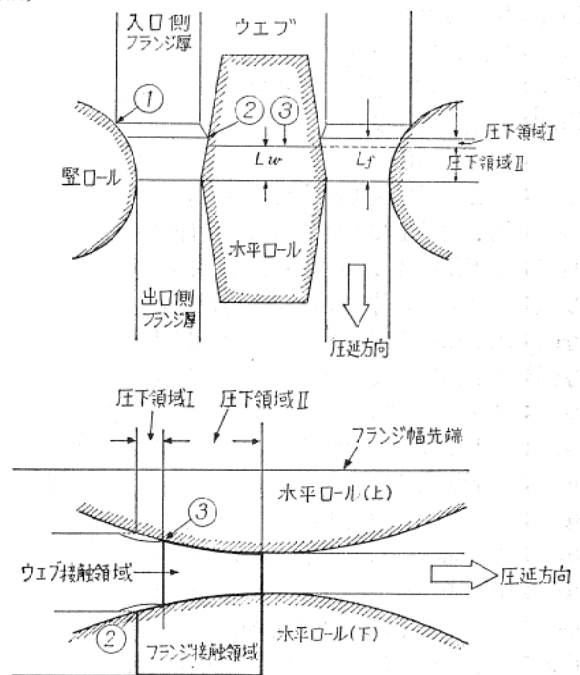


図-4. ウェブおよびフランジのロール接触順位

ここでは、フランジだけの単独接触領域を、
 圧下領域Ⅰ、ウェブとフランジがともに圧下さ
 れる領域を、圧下領域Ⅱとよぶことにする。

③ 圧下領域Ⅰにおいて、ウェブは水平ロー
 ルにより圧下されないが、フランジと一体にな
 っているため、フランジ圧下の影響により引張
 られ、ウェブ厚を減ずるいわゆるウェブ肉引け
 現象を呈する。

④ 圧下領域Ⅱにおいては、一般的にウェブ
 圧下率>フランジ圧下率のため、ウェブはフラ
 ンジによりその伸びを拘束され、圧延後のウェ
 ブ厚が水平ロール隙より大きくなり、ウェブ厚
 の復元を起こす。

⑤ 圧延温度はH形鋼圧延程度の材料厚みに
 になると内部温度が表面温度と大きく異なり、温
 度計による表面温度実測値は、その鋼材の平均
 温度として使用できない。

また、H形鋼はその幾何学的形状より、ウェ
 ブとフランジおよびフランジとフランジ間で相

互に保熱しあっており、圧延温度の推定を行な
 うためには、その効果を考慮する必要がある。

⑥ 圧下領域ⅠおよびⅡにおいて、ウェブと
 フランジの圧下率が異なるにもかかわらず、ウ
 ェブとフランジは一体として伸びるため、圧下
 率の大きい方に圧縮力、小さい方に引張力が作
 用する。水平ロールおよび縦ロールの圧延荷重
 は、この相互作用力の影響があるため、通常の
 板圧延荷重式では推定困難である。

⑦ 圧延所要動力は、圧延材と水平ロール側
 面の摩擦、および圧延材内部メタルフローな
 どの内部抵抗の影響が大きいいため、理想変形所要
 動力の約3倍を要する。

⑧ 縦ロールが無駆動であるため水平ロー
 ルの先進係数 δ_n は、 $\delta_n < 1$ と圧延材出側速度
 が、水平ロール外周速度より遅くなっている。

⑨ 板圧延において板幅は、圧延することに
 より必ず広がるが、ユニバーサルミルによるH
 形鋼圧延におけるフランジ幅は、ウェブとフラ

表-1. 記号一覧表

W_{t1} ; 圧延前ウェブ厚	S_{w1} ; 圧延前ウェブ断面積
W_{t2} ; 水平ロール接触開始時点のウェブ厚	S_{w2} ; ウェブが水平ロール接触開始時点のウェブ断面積
W_{t3} ; 圧延後ウェブ厚	S_{w3} ; 圧延後ウェブ断面積
F_{t1} ; 圧延前フランジ厚	S_{f1} ; 圧延前フランジ断面積 (片側)
F_{t2} ; ウェブが水平ロール接触開始時点のフランジ厚	S_{f2} ; ウェブが水平ロール接触開始時点のフランジ断面積 (片側)
F_{t3} ; 圧延後フランジ厚	S_{f3} ; 圧延後のフランジ断面積 (片側)
F_{h1} ; 圧延前フランジ幅	ΔM ; フランジからウェブへのメタルフロー (1パスにお ける)
F_{h2} ; ウェブが水平ロール接触開始時点のフランジ幅	ΔM_1 ; 圧下領域Ⅰにおけるフランジからウェブへのメタル フロー
F_{h3} ; 圧延後のフランジ幅	ΔM_2 ; 圧下領域Ⅱにおけるフランジからウェブへのメタル フロー
U ; ウェブ内法	R_h ; 水平ロール半径
η_w ; ウェブ延伸 (1パスにおける)	R_v ; 縦ロール半径
η_{w1} ; 圧下領域Ⅰにおけるウェブ延伸	\bar{R}_v ; 縦ロール相当半径
η_{w2} ; 圧下領域Ⅱにおけるウェブ延伸	S_h ; 水平ロール隙
η_f ; フランジ延伸 (1パスにおける)	S_v ; 縦ロール隙
η_{f1} ; 圧下領域Ⅰにおけるフランジ延伸	α ; 水平ロール側面テーパ
η_{f2} ; 圧下領域Ⅱにおけるフランジ延伸	L_w ; ウェブ投影接触長さ
η_h ; フランジ幅振り係数 (1パスにおける)	L_f ; フランジ投影接触長さ
η_{h1} ; 圧下領域Ⅰにおけるフランジ幅振り係数	
η_{h2} ; 圧下領域Ⅱにおけるフランジ幅振り係数	
η_t ; トータル延伸 (1パスにおける)	
η_{t1} ; 圧下領域Ⅰにおけるトータル延伸	
η_{t2} ; 圧下領域Ⅱにおけるトータル延伸	
λ_w ; ウェブ圧下係数 (W_{t1}/S_h)	
η'_{w2} ; 圧下領域Ⅱにおけるウェブ復元肉引けを考慮し たウェブ延伸	

ンジの圧下バランスによって広がったり、逆に減少したりする。

以上①から⑨まで述べたごとく、ウェブとフランジは強い相関をもっており、両者を統一的に説明することによって、初めてH形鋼の変形機構が明らかにされるのである。

3. メタルフロー

いま1パスの圧延過程においてフランジがウェブに向かって流れるメタルフロー量を ΔM とし、マスフローコンスタントの条件をみたすフランジおよびウェブの関係式を導くと、次のようになる。

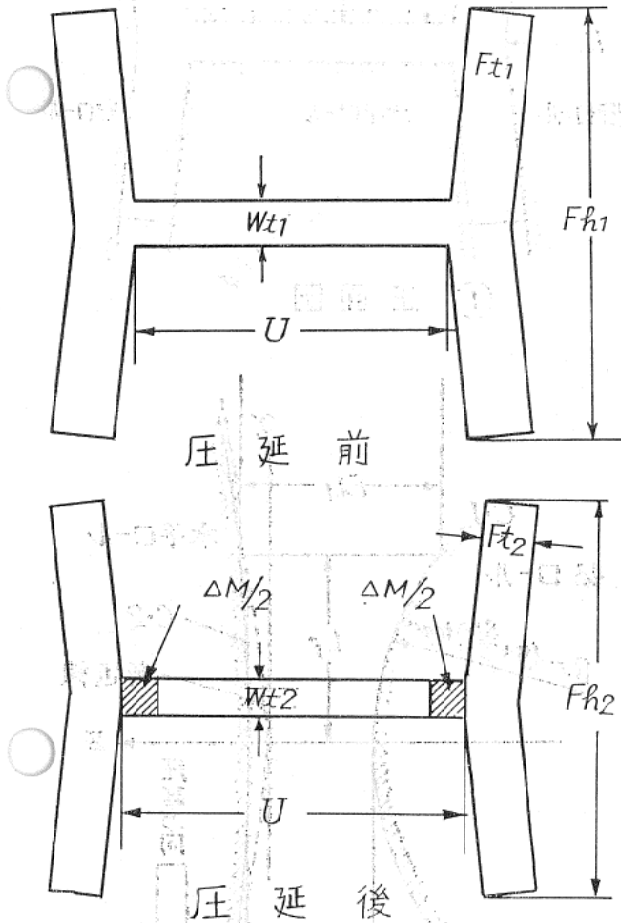


図5. H形鋼圧延における各部名称

$$\eta_t = \frac{S_{f1}}{S_{f3} + \frac{\Delta M}{2}} = \frac{S_{w1}}{S_{w3} - \Delta M} \quad (1)$$

上式で定義される η_t をトータル延伸とよぶ。また、

$$\eta_w = \frac{W_{t1}}{W_{t3}} \quad (2)$$

$$\eta_f = \frac{F_{t1}}{F_{t3}} \quad (3)$$

$$\eta_h = \frac{F_{h3}}{F_{h1}} \quad (4)$$

で定義される η_w, η_f, η_h をそれぞれウェブ延伸, フランジ延伸, フランジ幅拡がり係数と名付ける。

式(1), (2), (3), (4)より

$$\Delta M = \frac{2S_{f1} \cdot S_{w1}}{2S_{f1} + S_{w1}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_w} - \frac{\eta_h}{\eta_f} \right) \quad (5)$$

$$= S_{w1} \cdot \left(\frac{1}{\eta_w} - \eta_t \right) \quad (6)$$

$$= 2S_{f1} \cdot \left(\frac{1}{\eta_t} - \frac{\eta_h}{\eta_f} \right) \quad (7)$$

となる。

このような圧延前後の幾何学的関係式(5), (6), (7)より、メタルフロー量 ΔM を求めることは、圧延後のウェブ厚 W_{t3} , フランジ幅 F_{h3} が不明で、 η_h, η_w が未知数となるためできない。

プラスチックモデル圧延実験により、 ΔM を実測した結果を図-6に示す。

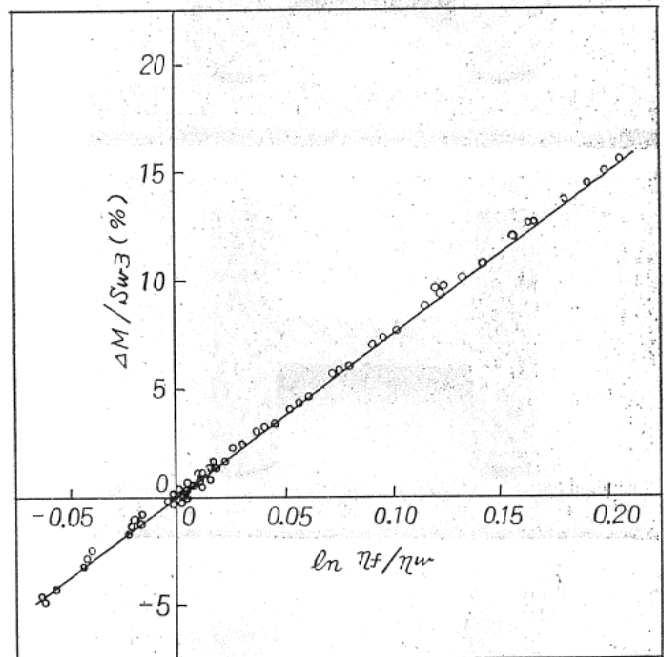


図6. メタルフロー量と(フランジ/ウェブ)延伸比との関係

図-6より

$$\Delta M = a \cdot S_{w3} \ln \left(\frac{\eta_f}{\eta_w} \right) \quad (8)$$

ただし、 a :サイズによって定まる係数となる。

式(8)より、メタルはフランジ延伸 η_f がウェブ延伸 η_w より大きいときには、フランジからウェブに流れ、逆にウェブ延伸 η_w がフランジ延伸 η_f より大きいときには、ウェブからフランジに向かって流れる。

このことは、後で述べるように圧下領域Ⅰにおいては、フランジ延伸 η_{f1} がウェブ延伸 η_{w1} より大きくメタルがフランジからウェブに流れ、圧下領域Ⅱにおいては、一般的にはウェブ延伸 η_{w2} がフランジ延伸 η_{f2} より大きいためメタルがウェブからフランジに向かって流れる現象を、総括的に記述したものとなっている。

写真-1に、プラスチシン実験によるH形鋼の圧延後の断面写真を示すが、写真よりウェブ

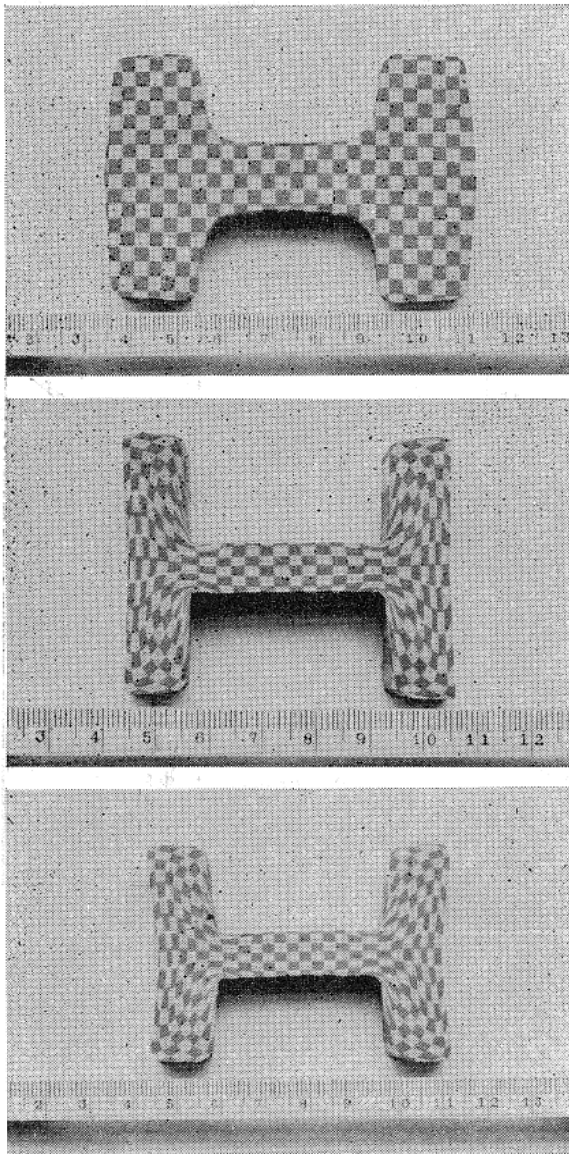
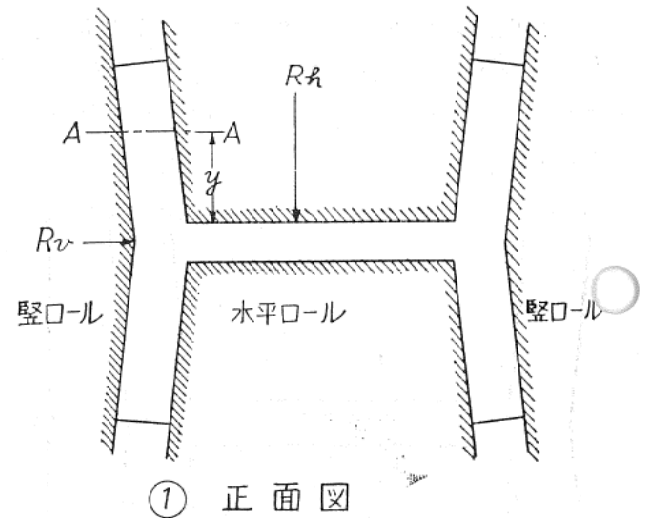


写真-1.

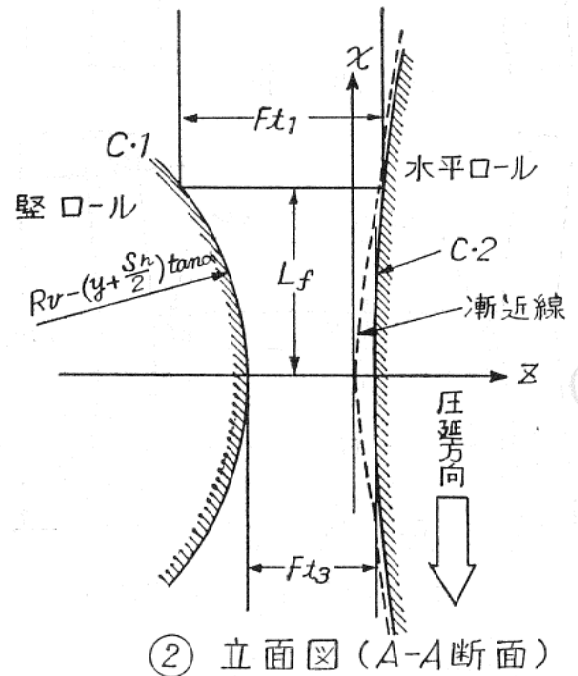
はほぼ厚み方向に均一に圧下されているのに対し、フランジは水平ロール側面摩擦の影響などにより、若干複雑な変形を呈している。

4. ウェブおよびフランジのロール接触位置

図-7のごとく圧延方向に x 軸、フランジ幅方向に y 軸、フランジ厚み方向に z 軸をとる。



① 正面図



② 立面図 (A-A断面)

図-7. フランジのロール接触位置

曲線 C・1 は円弧で、

$$\frac{z^2}{(R_h - y)^2} \cdot \tan^2 \alpha + \frac{x^2}{(R_h - y)^2} = 1 \quad (9)$$

曲線 C・2 は双曲線で、

$$x^2 + \left[z + S_v + R_v - \left(y + \frac{S_h}{2} \right) \cdot \tan \alpha - (R_h - y) \cdot \tan \alpha \right]^2 = \left[R_v - \left(y + \frac{S_h}{2} \right) \cdot \tan \alpha \right]^2 \quad (10)$$

となる。

したがって、フランジ投影接触長さを L_f 、圧延前のフランジ厚を F_{t1} とすれば、式(9)、(10)より、

$$L_f = [2 \cdot (F_{t1} - S_v) \cdot \bar{R}_v]^{1/2} \quad (11)$$

ただし、

$$\frac{1}{\bar{R}_v} = \frac{1}{R_v - \left(y + \frac{S_h}{2} \right) \cdot \tan \alpha} + \frac{\tan \alpha}{R_h - y} \quad (12)$$

この \bar{R}_v を、堅ロール相当半径とよぶことにする。

式(11)から明らかなように、フランジの投影接触長さ L_f は、ウェブの付根からフランジ幅方向への距離 y の関数になっている。

フランジ片幅と L_f 、およびフランジ片幅と堅ロール相当半径の関係を図-8に示す。

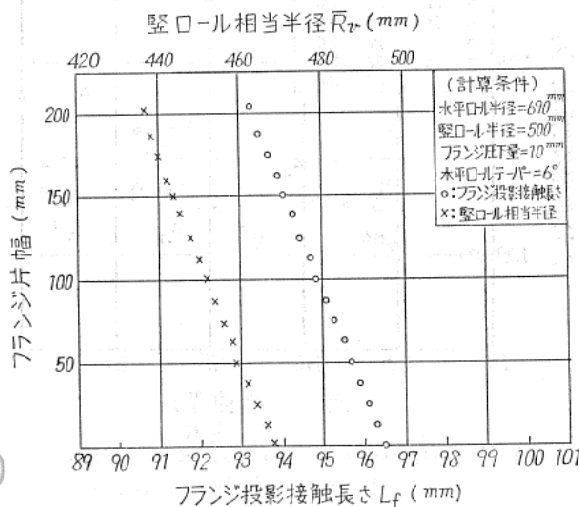


図-8. フランジ片幅とフランジ投影接触長さおよびフランジ片幅と堅ロール相当半径との関係

水平ロールテーパ α が小さい場合には、近似的に式(12)より $\bar{R}_v \approx R_v$ となるから、フランジ投影接触長さ L_f の近似値は y とは無関係に次式より求められる。

$$L_f = [2(F_{t1} - S_v)R_v]^{1/2} \quad (13)$$

次にウェブ投影接触長さ L_w を求める。この場合は板材の圧延の場合と同様に、

$$L_w = [(W_{t1} - S_h) \cdot R_h]^{1/2} \quad (14)$$

で求められる。

ウェブとフランジの投影接触長さが等しいのは、式(12)、(14)より、

$$\frac{R_h}{2\bar{R}_v} = F_{t1} - \frac{S_v}{W_{t1}} - S_h \quad (15)$$

の時である。すなわち、 L_w と L_f の大小は、水平ロールおよび堅ロール半径と圧延パススケジュールにより決定される。

各社の各ユニバーサルミルの圧延条件より見ると、

$$\frac{R_h}{2\bar{R}_v} \leq F_{t1} - \frac{S_v}{W_{t1}} - S_h \quad (16)$$

となるのが一般的である。すなわち、各社の大形のユニバーサルは、 $L_f > L_w$ の条件下で圧延が行なわれている。

ウェブおよびフランジのロール接触順位は、 L_w と L_f の大小により次のようになる。

$L_f > L_w$ の時

- ① フランジ外側面と堅ロール
- ② フランジ内側面と水平ロール側面
- ③ ウェブと水平ロール

$L_w \geq L_f$ の時

- ① ウェブと水平ロール
- ② フランジ内側面と水平ロール側面
- ③ フランジ外側面と堅ロール

すなわち、ユニバーサルによるH形鋼においては、1パスの圧延過程がフランジあるいはウェブのみの単独圧下領域と、ウェブとフランジが同時に圧下される領域とに分けられる。

5. 圧下領域 I における圧延メカニズム

この領域ではフランジのみが圧下され伸びようとするが、ウェブと一体となっているため、フランジ単独では伸びることができず、フランジはウェブの拘束により圧延方向に圧縮力を受ける。

ウェブには逆に、フランジが伸びようとする力による引張力が作用する。ウェブは、このフランジからの引張力により、若干圧延方向に引き伸ばされ、水平ロール接触前にウェブ厚を減じる。

かかる現象を、ここではウェブ肉引けとよぶ

ことにする。

プラスチック実験によるフランジ延伸と、ウェブ肉引けによる延伸の関係を図-9に示す。図からも明らかにウェブ肉引け現象のあることがわかる。

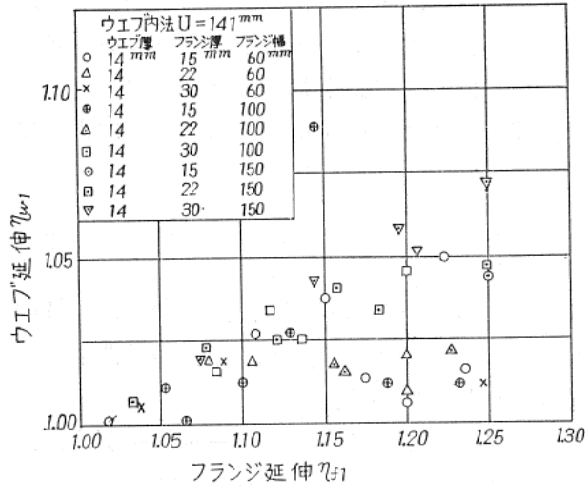


図-9. 圧下領域 I におけるウェブ肉引け (プラスチック実験結果による)

圧下領域 I におけるメタルフローの関係式を導くと、

フランジについては、

$$\eta_{f1} = \frac{2 \cdot S_{f1}}{2 \cdot S_{f1} \cdot \eta_{h1}} = \left(1 - \frac{\Delta M_1 \cdot \eta_{f1}}{2 \cdot S_{f1} \cdot \eta_{h1}}\right) \cdot \eta_{f1} \quad (17)$$

ウェブについては、

$$\eta_{w1} = \frac{S_{w1}}{S_{w1} - \Delta M_1} = (1 + \Delta M_1 \cdot \eta_{w1}) \cdot \eta_{w1} \quad (18)$$

となる。

圧下領域 I における η_{f1} , η_{w1} , η_{t1} の関係は、一般的に次の通りである。

$$\eta_{f1} > \eta_{t1} > \eta_{w1} \quad (19)$$

式(17), (18)が、式(19)を満足するためには、

$$\Delta M_1 > 0 \quad (20)$$

$$\Delta \eta_{h1} > 0 \quad (21)$$

でなければならない。

このことは図-10, 11に示したプラスチック実験結果からも確認されている。

すなわち、圧下領域 I においては、ウェブは水平ロールにより全く圧下されていないにもかかわらず、圧延方向にフランジと同一の延伸を保持しなければならないため、ウェブ肉引け、

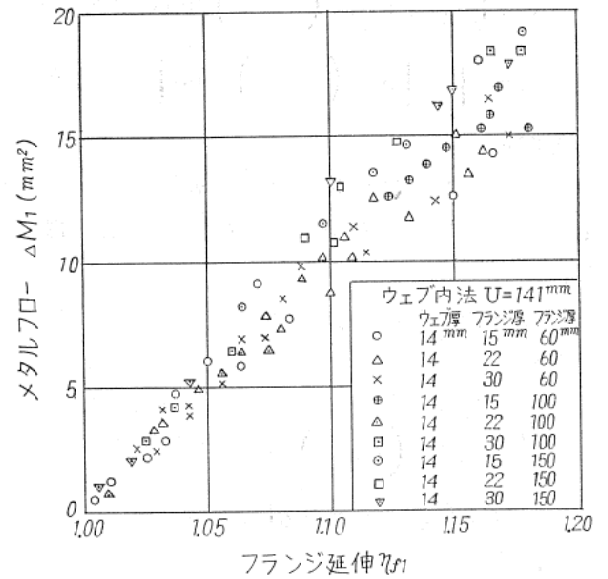


図-10. 圧下領域 I におけるメタルフロー (プラスチック実験結果による)

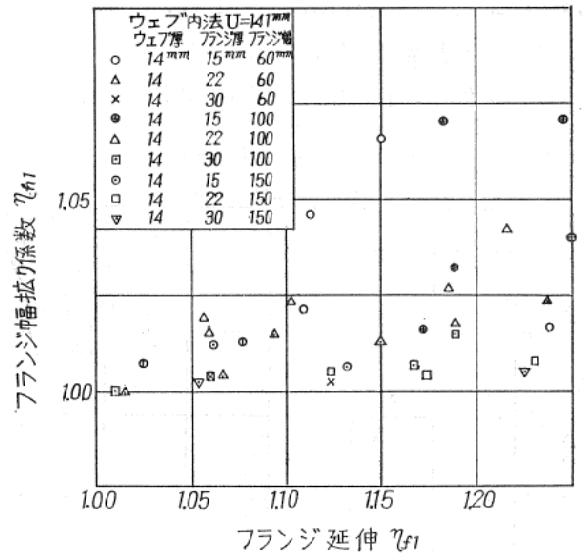


図-11. 圧下領域 I におけるフランジ幅拡がり (プラスチック実験結果による)

フランジからウェブへのメタルフロー、フランジ幅拡がりなどの諸現象が発生する。

圧下領域 I における圧延メカニズムを明らかにするためには、それらの諸現象を定量的に把握する必要がある。

式(17), (18)は、トータル延伸 η_{t1} , フランジ延伸 η_{f1} , ウェブ延伸 η_{w1} , フランジ幅拡がり係数 η_{h1} , メタルフロー量 ΔM_1 の5個を未知数として持っており、解くためにはさらに3つの方程式が必要である。

まず、 ΔM_1 はプラスチック実験より、式(8)

と同様にして、

$$\Delta M_1 = \frac{\alpha \cdot S_{w2} \cdot \ln \eta_{f1}}{\eta_{w1}} \quad (22)$$

と表わされる。

また、 η_{h1} は、

$$\eta_{h1} = \frac{2 \cdot S_{f1}}{(2S_{f1} + S_{w1})} \cdot \eta_{f1} + \frac{S_{w1}}{2S_{f1} + S_{w1}} \cdot \eta_{w1} \quad (23)$$

となる。

すなわち、トータル延伸 η_{t1} は、フランジ延伸 η_{f1} とウェブ延伸 η_{w1} を、フランジおよびウェブの断面積で荷重平均したものに等しい。

(図-12)

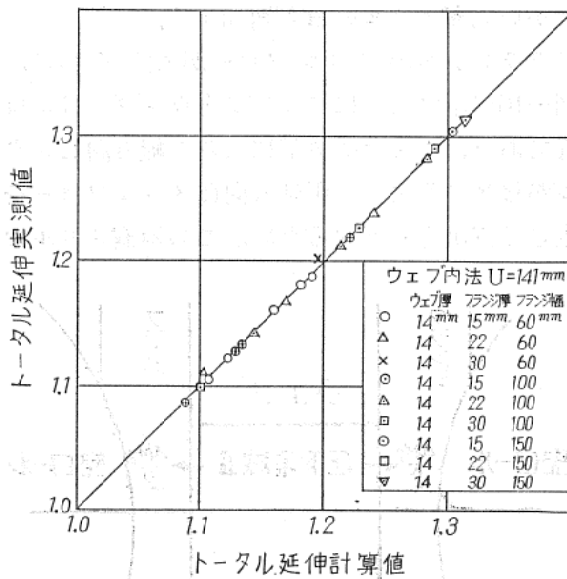


図-12. 圧下領域 I におけるトータル延伸の実測値と計算値の比較

さらに圧下領域 II において、フランジとウェブの投影接触長さは相等しいから、次式が成り立つ。

$$2\bar{R}_v(F_{t2} - S_v) = R_h(W_{t2} - S_h) \quad (24)$$

定義より

$$\eta_{t1} = \frac{F_{t1}}{F_{t2}} \quad (25)$$

$$\eta_{w1} = \frac{W_{t1}}{W_{t2}} \quad (26)$$

である。

したがって、式(17)、(18)、(22)、(23)、(24)、(25)、(26)より、 η_{f1} 、 η_{w1} 、 η_{t1} 、 η_{h1} 、 ΔM_1 が求まり、さらに W_{t2} 、 F_{t2} 、 F_{h2} も計算でき、圧下領域の圧延メカニズムが解明できる。

6. 圧下領域 II における圧延メカニズム

圧下領域 II におけるウェブおよびフランジの延伸を、それぞれ η_{w2} 、 η_{f2} とし、ウェブが水平ロール接触を開始する時点のウェブ厚 W_{t2} ($L_w \geq L_f$ のときは $W_{t2} = W_{t1}$)、フランジ厚 F_{t2} ($L_w \geq L_f$ のときは $F_{t2} = F_{t1}$)、フランジ幅 F_{h2} ($L_w \geq L_f$ のときは $F_{h2} = F_{h1}$) とすると、

$$\eta_{w2} = \frac{W_{t2}}{S_h} \quad (27)$$

$$\eta_{f2} = \frac{F_{h2}}{S_v} \quad (28)$$

となる。

(1) $\eta_{w2} > \eta_{f2}$ の場合

ウェブの延伸がフランジの延伸より大きいためウェブとフランジ間に作用する力関係は、圧下領域 I とは全く逆になり、ウェブはフランジにより拘束され圧縮力を受ける。

圧下領域 II の圧延前フランジ断面積 S_{f2} 、ウェブ断面積 S_{w2} は、

$$S_{f2} = F_{h2} \cdot F_{t2} \quad (29)$$

$$S_{w2} = W_{t2} \cdot U \quad (30)$$

であり、フランジおよびウェブについては次の関係式が成り立つ。

$$\eta_{t2} = \frac{2S_{f2}}{2S_{f2} \cdot \frac{\eta_{h2}}{\eta_{t2}} + \Delta M_2} = \left(1 - \frac{\Delta M_2 \cdot \eta_{f2}}{2 \cdot S_{f2} \cdot \eta_{h2}}\right) \cdot \frac{\eta_{f2}}{\eta_{h2}} \quad (31)$$

$$\eta_{t2} = \frac{S_{w2}}{S_{w2} - \Delta M_2} = \left(1 + \frac{\Delta M_2 \cdot \eta_{w2}}{S_{w2}}\right) \cdot \eta_{w2} \quad (32)$$

$\eta_{w2} > \eta_{f2}$ の条件を式(31)、(32)が満足するためには、

$$\Delta M_2 < 0 \text{ or } \eta_{h2} < 1 \quad (33)$$

となることが必要である。

プラスチック実験により ΔM_2 と η_{h2} を調査した結果を、図-13、14に示す。図から明らかなように、 $\eta_{w2} > \eta_{f2}$ の場合は、圧下領域 II においては圧下領域 I とは全く逆に、ウェブからフランジにメタルが流れ、フランジ幅も減少している。

さらに水平ロール隙 S_h と、圧延後のウェブ厚 W_{t3} の関係を見ると、図-15のように、

$$W_{t3} \geq S_h \quad (34)$$

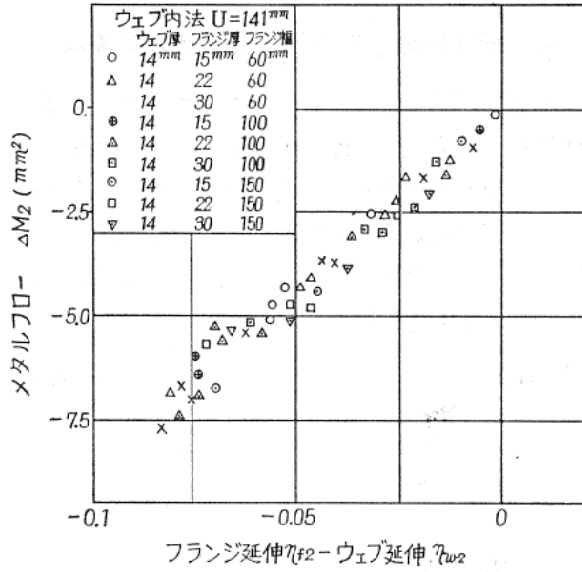


図-13. 圧下領域Ⅱにおけるメタルフロー (プラスチシン実験結果による)

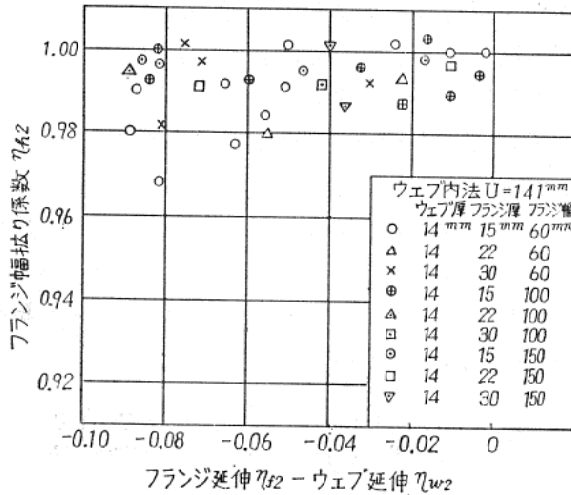


図-14. 圧下領域Ⅱにおけるフランジ幅拡がり (プラスチシン実験結果による)

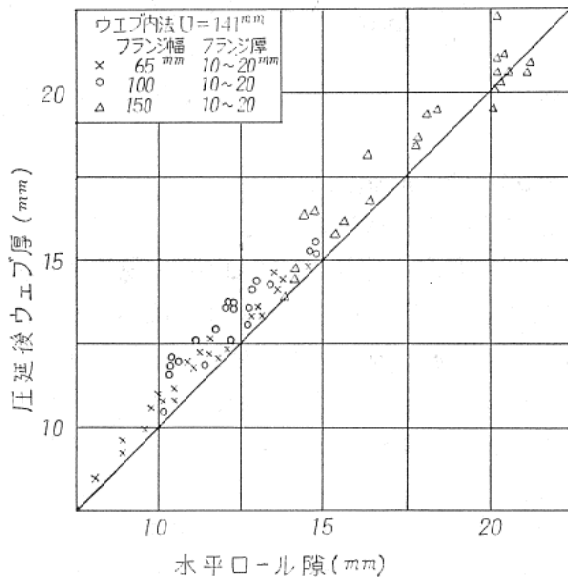


図-15. ウェブ復元量 (プラスチシン実験結果による)

となっている。すなわち、ウェブ厚は圧延後、若干復元していることになる。

この現象は次のように説明される。

$\Delta M_2 < 0, \eta_{w2} < 1$ の条件では、式(31)、(32)より

$$\eta_{w2} > \eta_{c2} > \eta_{f2} \quad (35)$$

となる。

圧延材は全体として η_{c2} しか伸びないにもかかわらず、ウェブは η_{w2} の延伸が与えられている。したがってウェブは、メタルがフランジにくらべて過剰となり、フランジへのメタルフローなどを生じることにより、この過剰メタルを消費している。しかし、 η_{w2} が大きくなるにしたがい過剰メタルの量も増加する。

フランジへのメタルフローが生じるのは、図-16に示すようにフランジとウェブの付根付近であり、ウェブ中央部になると幅方向にメタルが移動するより、圧延方向にメタルフローを生じる方が容易となるため、この過剰メタルの

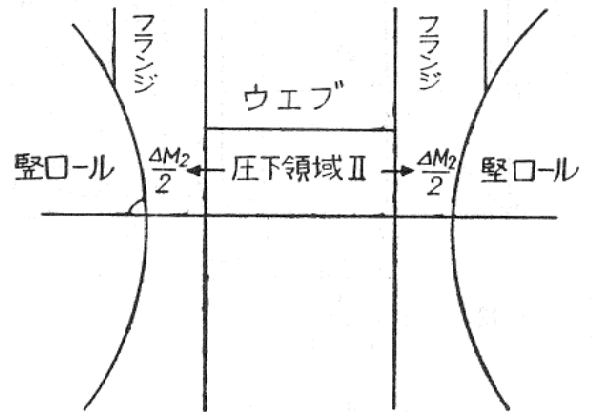


図-16. 圧下領域Ⅱにおけるメタルフロー

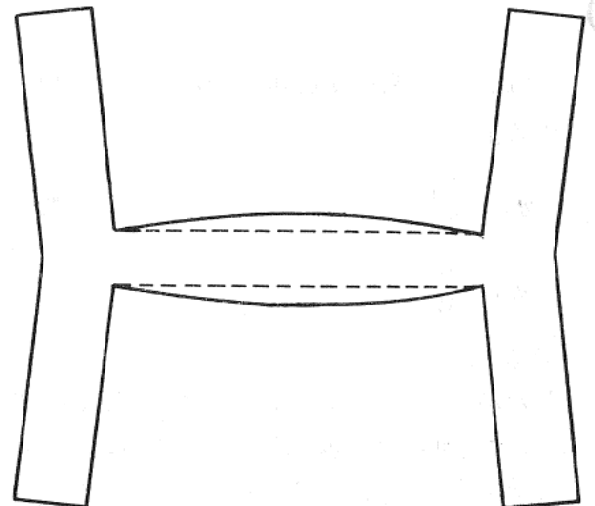


図-17. ウェブ復元説明図

一部を圧延方向にメタルフローさせる。これがウェブ復元となる。ウェブの復元した圧延後の断面は、図-17に示すように、ウェブ中央部がウェブ両端に比較し、厚くなっているのがプラスチック実験により確認された。このウェブ復元量が大きくなりすぎた場合にウェブは座屈し、ウェブ波となるものと考えられる。

(2) $\eta_{f2} \geq \eta_{w2}$ の場合

フランジの延伸がウェブの延伸より大きいため、ウェブとフランジ間に作用する力関係は、圧下領域 I と同様に、フランジがウェブに拘束されることになる。

$\eta_{f2} > \eta_{w2}$ の条件を、式(31)、(32)が満足するためには、

$$\Delta M_2 \geq 0 \text{ or } \eta_{h2} \geq 1 \quad (36)$$

となることが必要である。

ΔM_2 , η_{h2} のプラスチック実験結果は、 $\Delta M_2 > 0$ で $\eta_{h2} \geq 1$ となっている。また、水平ロール隙 S_h と圧延後ウェブ厚 W_{i3} との関係は、

$$W_{i3} \leq S_h \quad (37)$$

となっている。

これは、 $\eta_{w2} > \eta_{f2}$ の場合とは逆に、圧下領域 II においても、ウェブに比べフランジのメタルが過剰となるため、フランジ幅拡りを生じるとともに、ウェブへのメタルフローを生ずることにより、フランジはウェブとのバランスを保っている。

しかし、アンバランスの度合が激しくなるに

つれ、メタルフロー量も増大するが、ウェブにメタルが流れこむのはフランジの付根部のみであるから、ウェブの幅方向に厚み差が生じ、図-18のごとくウェブ肉引けを呈する。

$\eta_{w2} > \eta_{f2}$ あるいは $\eta_{f2} \geq \eta_{w2}$ のいずれの場合も、圧下領域 II におけるトータル延伸 η_{t2} 、ウェブ延伸 η_{w2} 、フランジ幅拡り係数 η_{h2} 、メタルフロー量 ΔM_2 は、次のようにして求められる。

$$\Delta M_2 = a \cdot S_{w3} \cdot \ln \frac{\eta_{f2}}{\eta'_{w2}} \quad (38)$$

$$\eta_{t2} = \frac{2S_{f2}}{2S_{f2} + S_{w2}} \cdot \eta_{f2} + \frac{S_{w2}}{2S_{f2} + S_{w2}} \cdot \eta'_{w2} \quad (39)$$

したがって、式(31)、(32)、(38)、(39)より、 η_{t2} 、 η'_{w2} 、 η_{h2} 、 ΔM_2 が解け、さらに圧延後の復元を考慮したウェブ厚 W_{t3} 、フランジ幅 F_{h3} も求まることになり、圧下領域 II における圧延メカニズムが解明される。

7. おわりに

以上、H形鋼の変形機構について、その概要を紹介した。オンラインミルの圧延特性値についても、現在、多量のデータと良好な解析結果を得ているが、その詳細については次の機会にゆずりたい。

なお、本論で紹介した研究結果は、現場の操業管理、技術管理面にフィードバックされて、大いにその成果を発揮しつつあることは勿論のこと、形鋼圧延における計算制御システムの開発に際して有力な基礎を提供するものである。

最後に、本論文の作成に際し、加茂川喜郎、土屋孝男両君をはじめ、関係各位から多大の協力を得た。ここに附記し、感謝の意を表す次第である。

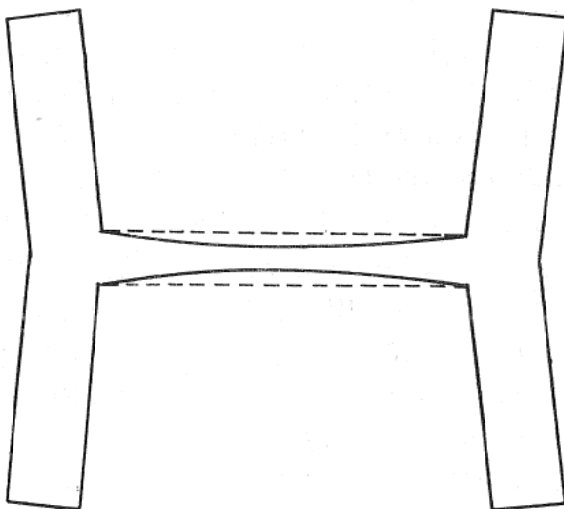


図-18. 圧下領域 II における肉引け ($\eta_{f2} > \eta_{w2}$ の場合)