

広幅材のロールフォーミングにおける成形性

山梨大学 工学部 機械システム工学科

教授 小野田義富

(平成7年度研究開発助成 AF-95002)

キーワード：ロールフォーミング、ハット形鋼、あばら波

1. 研究の目的と背景

主に建築材などに使用されるハット形鋼はロールフォーミングにより成形されるが、素板はロールとの接触領域およびその付近において複雑な三次元変形をするため、成形条件によっては製品にポケットウェーブ、縁波および折り曲げ部の腰折れなどの形状不良が発生する。これまでの研究ではこれらの形状不良の発生機構について定性的に考察したものが多く¹⁾⁴⁾、素板に発生するひずみおよび応力の大きさから定量的に説明したものはほとんど見られない。そこで本研究では弾塑性有限要素法による薄肉ハット形鋼のロールフォーミングプロセスのシミュレーションを行い、形状不良の発生機構を力学的に解明し、かつ形状不良に及ぼす素板の機械的性質および断面寸法の影響を明確にし、広幅材のロールフォーミング加工に適した素板の製造技術の向上に資することを目的とする。

本報告ではハット形鋼の単スタンド(曲げ角 30°)成形時にフランジ部に発生するあばら波の発生機構について

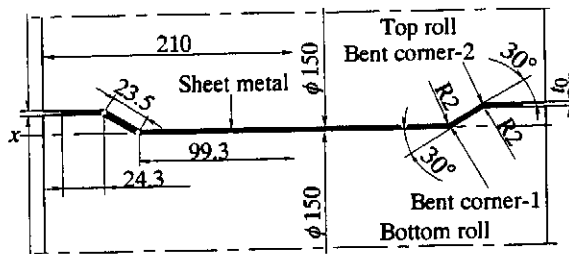


図1 成形ロールの寸法

素板の機械的性質を踏まえ、主として素板に発生するひずみにより検討した結果を述べる。

2. 研究方法

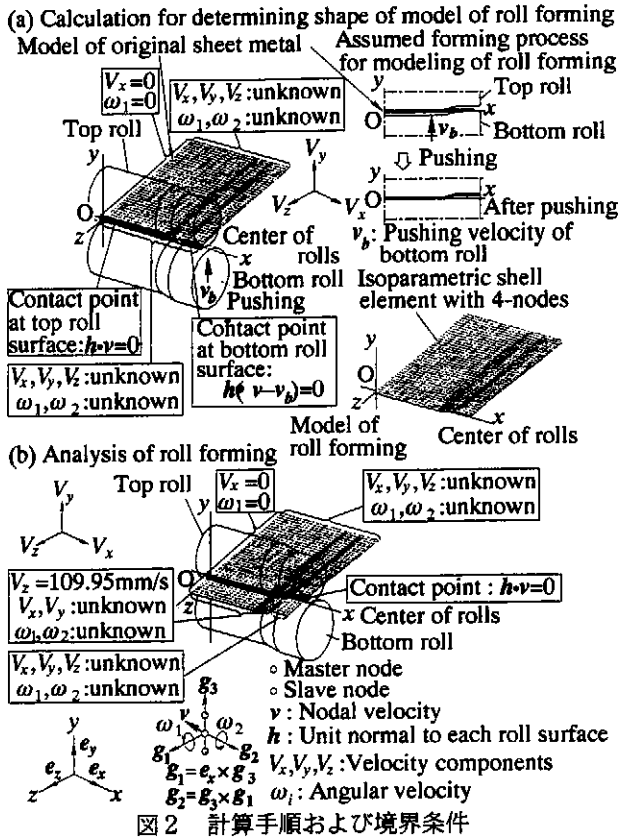
図1に本研究で用いる成形ロールの主な寸法を示す。本研究では対称面($x=0\text{mm}$)からコーナー部1までをウェブ部、コーナー部1からコーナー部2までを傾斜部、コーナー部2から板縁までをフランジ部とそれぞれ呼ぶことにする。

表1に本研究で用いる素板の寸法および機械的性質をそれぞれ示す。Sheet-1およびSheet-2の素板は、実際の表面処理鋼板である。Sheet-3およびSheet-4の素板は機械的性質が素板の変形挙動に及ぼす影響を調査するため、機械的性質を仮定したものである。Sheet-3は素板Sheet-2における降伏伸びをなくした素板である。Sheet-4は素板Sheet-2における降伏伸びをなくし加工硬化指数(n 値)を高くした素板である。素板Sheet-5は、チタン板(結晶粒径 $23\mu\text{m}$)相当の板である。

薄肉広幅断面材のロール成形では通常ロールギャップを素板の板厚にほぼ等しく設定するので、本研究では板厚方向の対して平面応力状態を仮定し、山梨大学で作成したシェル要素(4節点四辺形 isoparametric 要素)による弾塑性有限要素シミュレータ(ベンチマークテスト済)を用いて解析を行う。シミュレータの主な内容は、updated Lagrangian 速度方式、r-min法による増分量の制御およびHillの異方性にもとづく弾塑性構成式を採用したものとなっている。シェル要素の要素剛性マトリックスの積分評価法として、板厚方向に対してはGaussの数値積分を、板面内の各方向に

表1 供試素板の寸法および機械的性質

	Initial thickness t_0 /mm	Initial width b_0 /mm	Young's modulus E /MPa	Poisson's ratio ν	Initial yield stress σ_e /MPa	Flow stress $\bar{\sigma}$ /MPa	r-value		
							r_0	r_{45}	r_{90}
Sheet-1 (Carbon steel)	0.550	294.1	185171	0.2965	319.69	$\bar{\sigma} = 374.360(\bar{\epsilon}^P + 0.0207)^{0.041}$ ($\bar{\epsilon}^P \leq 0.05371$)	1.188	0.782	1.639
$\bar{\sigma} = 566.211(\bar{\epsilon}^P + 0.0235)^{0.148}$ ($\bar{\epsilon}^P \geq 0.05371$)									
Sheet-2 (Carbon steel)			185947	0.2839	366.56	$\bar{\sigma} = 396.871(\bar{\epsilon}^P + 0.0058)^{0.015}$ ($\bar{\epsilon}^P \leq 0.04237$)			
$\bar{\sigma} = 637.735(\bar{\epsilon}^P + 0.0112)^{0.150}$ ($\bar{\epsilon}^P \geq 0.04237$)									
Sheet-3 (Assumed)						$\bar{\sigma} = 682.908(\bar{\epsilon}^P + 0.0877)^{0.256}$			
Sheet-4 (Assumed)	$\bar{\sigma} = 1592.499(\bar{\epsilon}^P + 0.0394)^{0.454}$								
Sheet-5 (Assumed)	106300	0.432	158	$\bar{\sigma} = 628.12(\bar{\epsilon}^P + 0.00009)^{0.148}$	4.05				



対しては安定化マトリックス法による積分をそれぞれ行う積分方法を採用している。この場合、shear lockingを回避するため安定化マトリックスの面外せん断成分を無視した低減積分を行っている。

図2(a)にロール押し込みによる初期モデル作成上の計算手順および速度境界条件を、図2(b)に図2(a)で作成した解析モデルを使用したロール成形プロセスの解析のための速度境界条件をそれぞれ示す。本研究では、素板出口断面に対する速度境界条件を決定するために、素板とロールの摩擦を考慮することができる剛塑性有限要素法を用いてロール直下における素板の長手方向節点速度の解析を行っている。

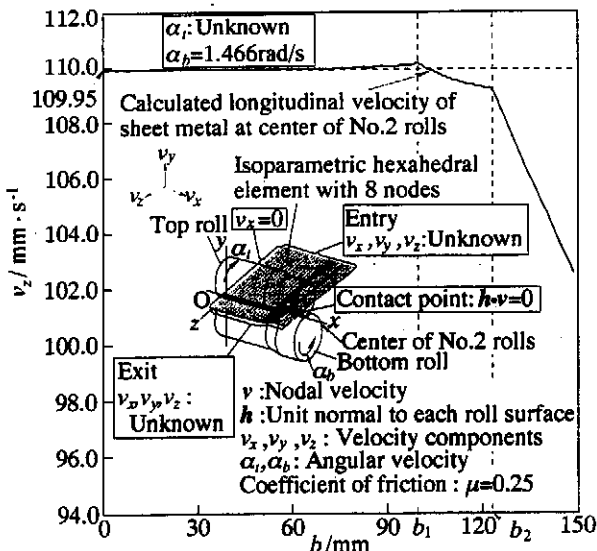


図3 剛塑性FEMによるロール直下における算出長手方向速度

る。図3に剛塑性有限要素法により算出されたロール直下における板厚中央面の長手方向節点速度を示す。対称面からコーナー部2までは長手方向節点速度がウェブ部におけるロールの周速にほぼ等しくなっていることがわかる。一方、コーナー部2から板縁におけるの長手方向節点速度は板縁に向かうにつれて小さくなっていることがわかる。以上の結果を踏まえて本研究では、ロール成形時における速度境界条件は入口断面については未知に、出口断面については対称面からコーナー部2までは長手方向節点速度をウェブ部におけるロールの周速に等しい $v_z = 109.95 \text{ mm/s}$ とし、コーナー部2から板縁までは未知とする⁵⁾。

本研究では、素板先端から70mmおよび80mmまで成形が進行した場合の計算結果について考察を行う。

3. 研究成果

3.1 変形形状

図4にフランジ部に発生するあばら波の写真を示す。一例として素板Sheet-1の場合を示す。本研究で言うあばら波はフランジ部に見られる周期的な曲線状の折れを指す。図5に素板Sheet-1の中止め材の上表面の実測3次元変形形状を示す。ロールの入口付近におけるフランジ部は、コーナー部2から上流の板縁にかけて上向きに凸の変形形状となる。図6に素板Sheet-1の板厚中央面の算出3次元変形形状を示す。ただし素板先端から成形が進行した z 方向距離(f)が $f=70 \text{ mm}$ の場合を示す。またウェブ中央($x=0 \text{ mm}$)から板厚中央面に沿う幅方向(x 方向)距離を b とする。ロールの入口付近におけるフランジ部の算出変形形状は図5に示した実測変形形状とほぼ同様である。

3.2 あばら波の発生機構

図7にロール入口側のフランジ部に発生する算出主ひずみ(膜・曲げ)分布を示す。一例としてSheet-1の場合を示す。板厚中央面に発生する膜主ひずみ(ϵ_{mp})を図7(a)に、素板上表面に発生する曲げ主ひずみ(ϵ_{bp})を図7(b)にそれぞれ示す。図7(a),(b)中の破線は、図6に示したロールの入口付近におけるフランジ部の上向きに凸の形状の稜線を表す。この稜線に沿って、素板には圧縮の膜主ひずみ($\epsilon_{mp} < 0$)および素板上表面方向に凸となる曲げ

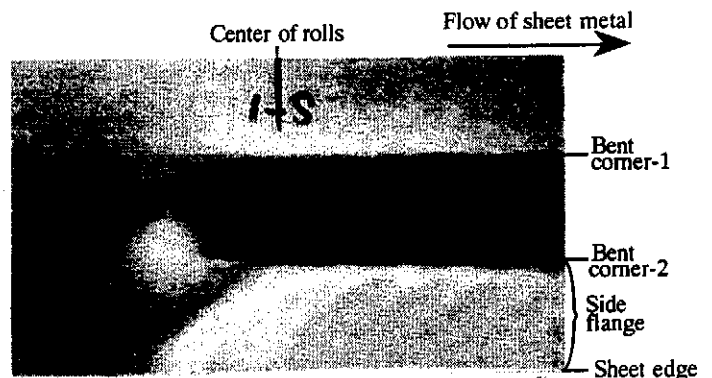


図4 あばら波の例 (Sheet-1)

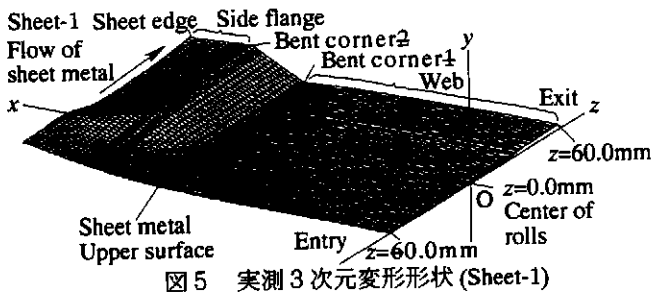


図5 実測3次元変形形状 (Sheet-1)

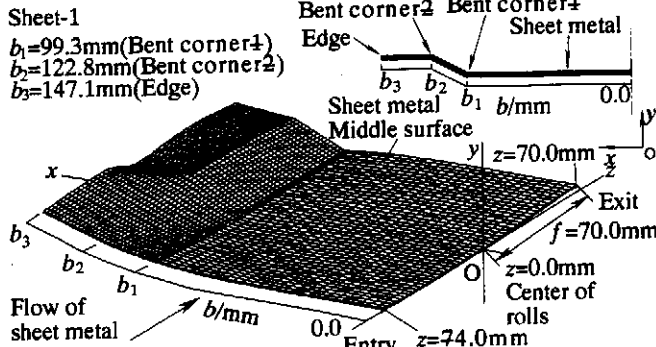


図6 算出3次元変形形状 (Sheet-1)

主ひずみ ($\epsilon_{bp} > 0$), 素板下表面では符号逆の曲げひずみ ($\epsilon_{bp} < 0$) が発生していることがわかる。他の素板の場合も同様の傾向となる結果を得ている。このロール入口付近におけるフランジ部に発生する算出主ひずみの分布を模式的に示すと図8のようになる。ただし図8では素板下表面に対して図示している。図8中の α 曲線は、図6に示したロールの入口付近におけるフランジ部の上向きに凸の形状の稜線を表す(図7の破線と同一)。この α 曲線と直角方向の素板下表面には、曲げによる圧縮の主ひずみ ($\epsilon_{bp} < 0$) と圧縮の膜主ひずみ ($\epsilon_{mp} < 0$) とが重なり(ただし $|\epsilon_{bp}| > |\epsilon_{mp}|$)、絶対値の大きな圧縮の主ひずみ ($\epsilon_{p \min} < 0$) が発生する。これにより素板下表面には肉厚方向に近い方向に引張ひずみ(素板上表面には圧縮ひずみ)が発生する(引張ひずみ > 圧縮ひずみ)。このため α 曲線に沿う素板

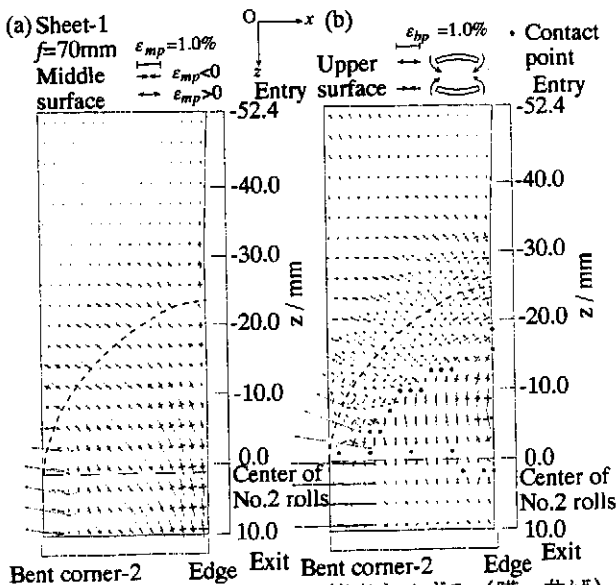


図7 フランジ部に発生する算出主ひずみ (膜, 曲げ) (Sheet-1)

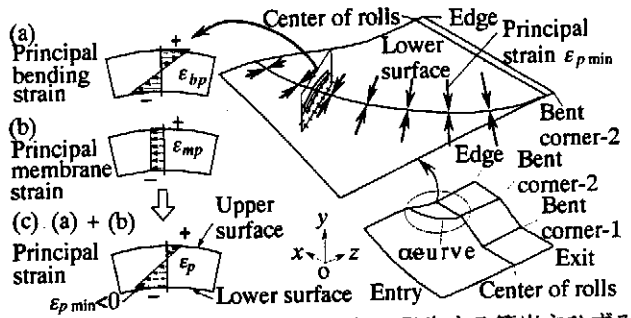


図8 ロール入口側のフランジ部に発生する算出主ひずみの分布の模式説明

下側層には図9~図13に示すようにいずれの素板の場合も素板上側層における値より大きな相当塑性ひずみ ($\bar{\epsilon}^p$) が発生する。これらの図から次のようなことがわかる。各図の(b)図の $f=70\text{mm}$ の場合において、ロールの入口側で各 b の位置における $\bar{\epsilon}^p$ の値が最初にピークを示す。z方向の各位置は、各 b の位置における α 曲線のz座標とそれぞれほぼ対応する。この $\bar{\epsilon}^p$ のピーク値は、コーナー部2の位置に近いほど大となる。さらに成形が10mm進行した $f=80\text{mm}$ の場合には、 $f=70\text{mm}$ の場合に上述した $\bar{\epsilon}^p$ の値が最初にピークを示すz方向の位置における $\bar{\epsilon}^p$ の値は、いずれの b の位置においても減少する(各図(b)図参照)。つまり α 曲線上では、 $\bar{\epsilon}^p$ の値は一定ピッチで増減を繰り返すことがわかる。これによりロールの出口側ではフランジ部の下側層の $\bar{\epsilon}^p$ は、一定ピッチの波状の推移を示す。

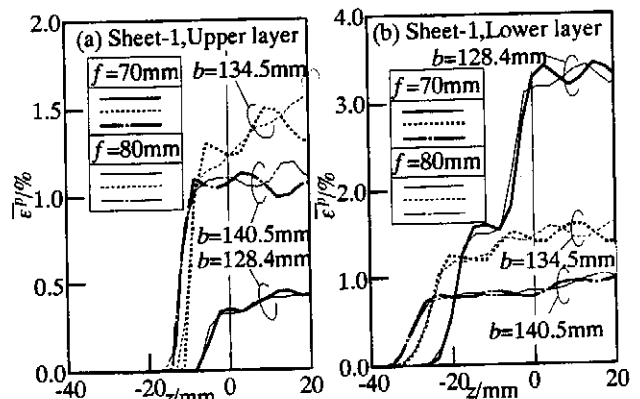


図9 フランジ部に発生する相当塑性ひずみの推移 (Sheet-1)

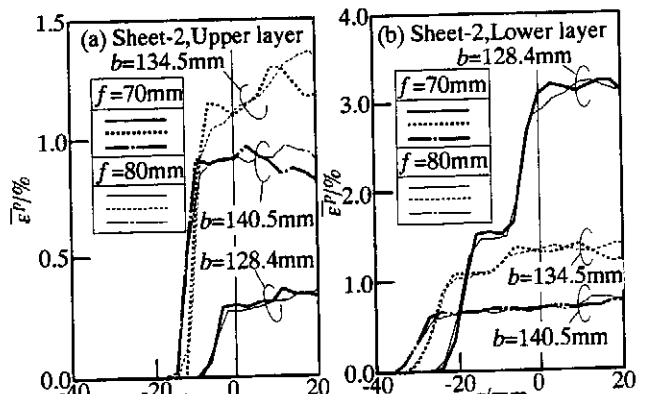


図10 フランジ部に発生する相当塑性ひずみの推移 (Sheet-2)

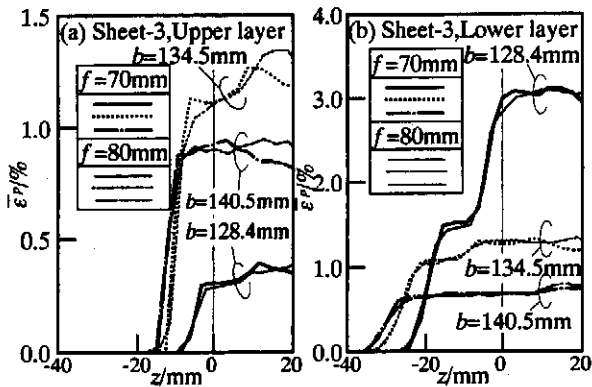


図 1 フランジ部に発生する相当塑性ひずみの推移 (Sheet-3)

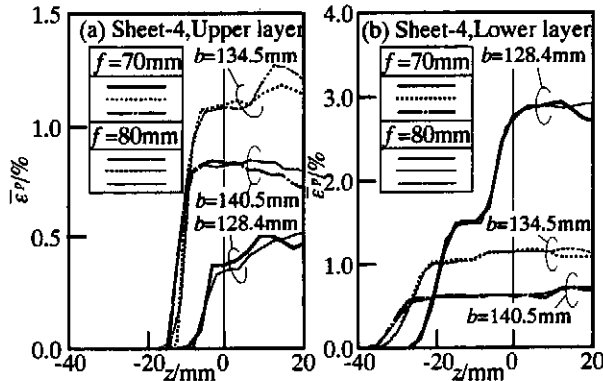


図 1 2 フランジ部に発生する相当塑性ひずみの推移 (Sheet-4)

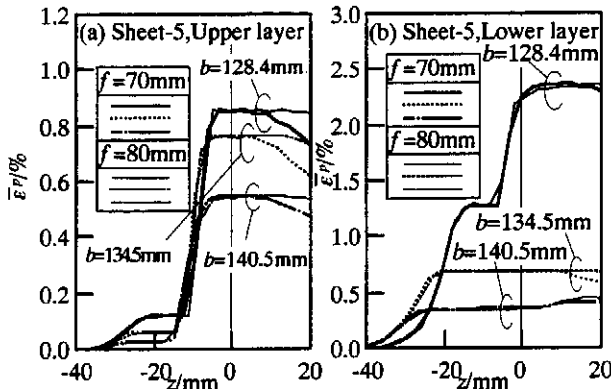


図 1 3 フランジ部に発生する相当塑性ひずみの推移 (Sheet-5)

この $\bar{\epsilon}_p$ の波のピッチは、発生したあばら波のピッチとほぼ対応する。

3・3 素板の機械的性質とあばら波の関係

図 1 4 に図 8 に示した α 曲線上のフランジ部のほぼ中央の位置($b=134.5\text{mm}$)における下表面の圧縮の主ひずみの絶対値 $|\epsilon_{p\text{min}}|$ およびその下側層の相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_p$ と素板の機械的性質との関係を示す。 $|\epsilon_{p\text{min}}|$ および $\bar{\epsilon}_p$ の値はいずれの f の場合も素板の初期降伏応力(σ_e)が高いほど、 n 値が大となるほど、ヤング率(E)が低いほどいずれも小となる。また $f=70\text{mm}$ と $f=80\text{mm}$ における $|\epsilon_{p\text{min}}|$ の差および $\bar{\epsilon}_p$ の差と σ_e, n 値, E との関係についても同様である。

4. 結 言

素板のヤング率が一定の場合には、降伏応力が高いほど、また降伏応力が一定では n 値が大きいほどロール入口

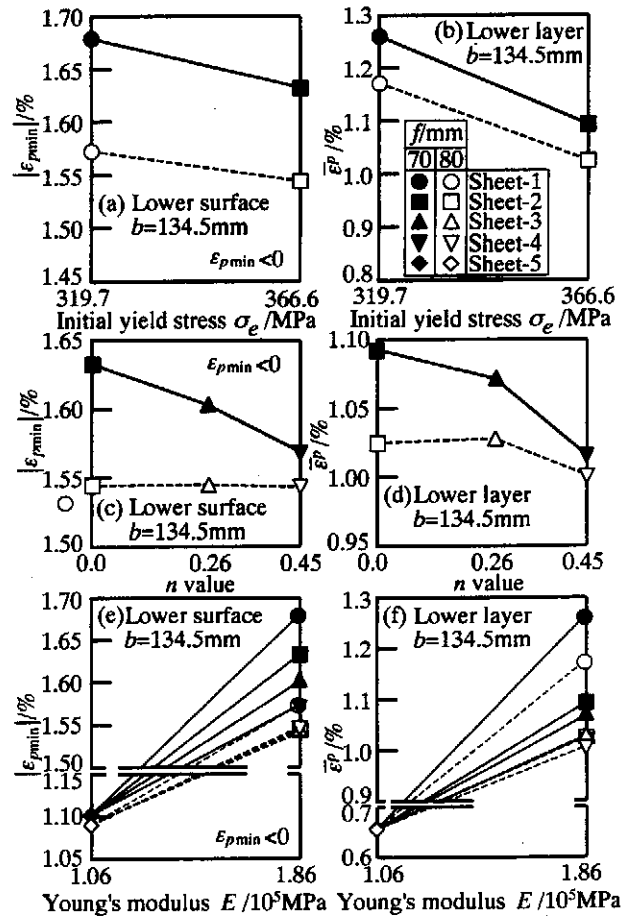


図 1 4 素板の機械的性質(σ_e, n 値, E)がロール入口側のフランジ部に発生するひずみ($|\epsilon_{p\text{min}}|, \bar{\epsilon}_p$)に及ぼす影響

におけるフランジ部の α 曲線に沿う下側層に発生する相当塑性ひずみの値および成形の進行に伴うその変動幅はいずれも小さくなり、あばら波は発生しにくい。

素板のヤング率が小さい場合には、ロール入口におけるフランジ部の α 曲線に沿う下側層に発生する相当塑性ひずみの値および成形の進行に伴うその変動幅はいずれもかなり小さくなり、あばら波は発生しにくい。

謝 辞

本研究の実施にあたりご援助いただいた(財)天田金属加工機械技術振興財団に厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば、鈴木弘・木内学・新谷賢・三浦史明：塑性と加工，18-196(1977),365.
- 2) 例えば、小野田義富・小門純一・藤原俊二・斎藤晋三：同上，19-205(1978),107.
- 3) 比良隆明・阿部英夫・中川吉左衛門・小泉豊・佐伯正介：同上，20-225(1979),933.
- 4) 例えば、小奈弘・神馬敬・嶋田政志・森本秀夫：同上，23-258(1982),664.
- 5) 小野田義富・長町拓夫・中込章浩・河野光雄：4 6 回塑加連講論，(1995),367.