
H 形鋼 R 部の機械的性質の改善

Improving the Mechanical Properties of Fillet Part in H-shapes

中西 輝行(Teruyuki Nakanishi) 荒木 正和(Masakazu Araki) 人見 潔(Kiyoshi Hitomi) 阿久根 俊幸(Toshiyuki Akune)

要旨：

H 形鋼 R 部の機械的性質は、断面各位置で最も劣っている。R 部の材質を改善する目的で、低温度領域で圧縮ひずみや剪断ひずみを与える実験を行い、ひずみ量と材質改善結果の関連を把握した。実験した圧延方法を実機で応用した結果、R 部の材質は大幅に改善された。またその改善程度は相当塑性ひずみで説明ができた。

Synopsis：

To improve mechanical properties of the fillet portion known for the lowest performance in all cross-sections of H-shapes, experiment was conducted to increase compression strain and shear strain at low temperatures, and relationships between strain and improved mechanical properties have been studied. Rolling techniques thus found have been applied to actual mills to see wide improvements in mechanical properties of the fillet portion, and the improvements can be attributable to equivalent plastic strain.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

H 形鋼 R 部の機械的性質の改善

Improving the Mechanical Properties of Fillet Part in H-shapes

中 西 輝 行*
Teruyuki Nakanishi荒 木 正 和**
Masakazu Araki人 見 潔***
Kiyoshi Hitomi阿久根 俊 幸****
Toshiyuki Akune

Synopsis:

To improve mechanical properties of the fillet portion known for the lowest performance in all cross-sections of H-shapes, experiment was conducted to increase compression strain and shear strain at low temperatures, and relationships between strain and improved mechanical properties have been studied. Rolling techniques thus found have been applied to actual mills to see wide improvements in mechanical properties of the fillet portion, and the improvements can be attributable to equivalent plastic strain.

1. 緒 言

H 形鋼の機械的性質は断面各位置で異なっており、特にそのフィレット部（以下 R 部と称す）は強度・靱性ともに劣っている¹⁾。これは変形がデッドメタル的であること、圧延温度が断面各位置の中で最も高いこと、および圧延後の冷却速度が遅くフェライト粒径が大きくなることによるものである。さらに制御圧延を行ってもこの部分の材質改善の効果は少ない。R 部の材質を改善し、断面内の機械的性質を均一にすれば、レベラー矯正時の脆化程度の減少、および残留応力の影響も加わった曲げやガス切断などの 2 次加工時の割れ発生防止の効果のほか低温用等のより厳しい使用条件への適用が期待できる。そのため R 部の材質改善を目的として、ユニバーサルミル圧延中の R 部の変形状態を改善させる実験を行い、ひずみ量と材質改善効果の関連を把握することができたのでその結果について以下に報告する。

2. プラスチシンモデルによる R 部の材質を改善するための圧延方式の検討

R 部の変形状態を変更する圧延方式を Fig. 1 に示す。粗ユニバーサルミル (U_R) 1 基と仕上ユニバーサルミル (U_F) 1 基を使用する場合は、Fig. 1(a) に示すように BD ミルで通常の圧延成形を行った材料を堅ロールまたは水平ロールに凹状の孔型を設けた U_R で圧延することにより、R 部の外側または内側に凸状の突起を形成し、これを U_F で集中強圧下し通常の H 形鋼製品にするものである。また 2 基の U_R をもつミル配列の場合、Fig. 1 (b) に示すごとく水平ロールに凹状の孔型を設けたミル (U_1 ミル) と堅ロールに凹状の孔型を設けたミル (U_2 ミル) で往復パスの間に交互に圧延することにより、R 部に剪断変形を与え、さらに U_R ミル群で形成した凸部を U_F ミルで集中強圧下し通常の製品にするものである。

以上の圧延方式における R 部でのメタルフロー

* 水島製鉄所条鋼圧延部条鋼技術室主任(課長待遇)

*** 水島製鉄所条鋼圧延部人形課課長
(昭和54年11月16日原稿受付)

** 水島製鉄所管理部検査課課長

**** 水島製鉄所管理部条鋼管理課

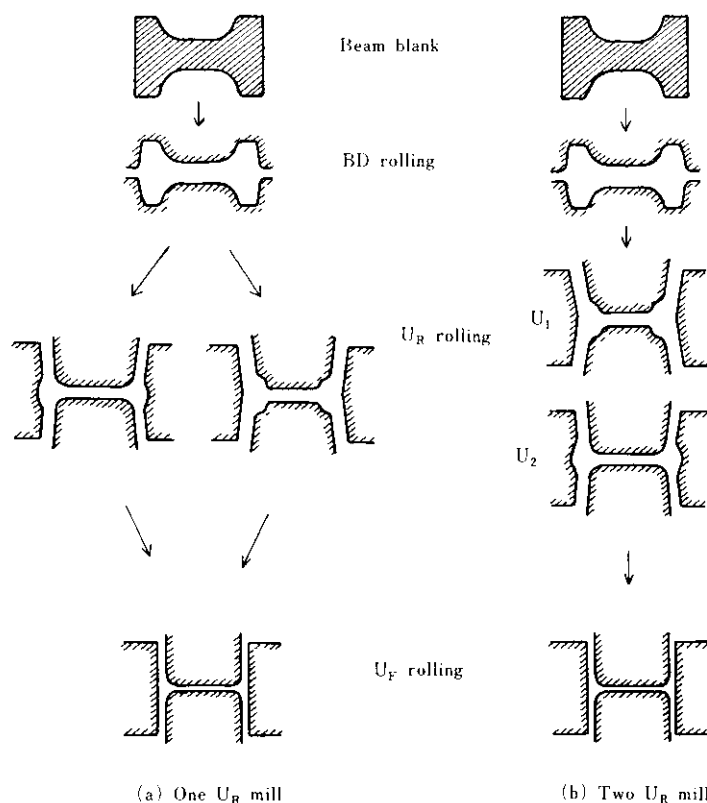


Fig. 1 Rolling method for improving the mechanical properties of fillet part in H shapes

を調査するため、プラスチシンモデルミルによる実験を行った。

U_R ミル1基の場合、 U_R 最終形状として Fig. 2 に示すように通常のものとは R 部内外に突起を有するものの3種類の素材を作成し、これらを U_F ミルで圧延した。内部メタルフローの状態を Fig. 3 に示す。この図から R 部の外側に形成された突起を

集中強圧下する方法が R 部全体のひずみを増加させるのに最も有効であることが推測される。

U_R ミル2基の場合に対しては、Fig. 4 に示す U_R 途中形状の材料を Fig. 5 に示すロールで圧延した。内部メタルフローの状態を Fig. 6 に示す。この実験により R 部外側凸形状から内側凸形状への圧延ではフランジ側 R 止まり近傍のひずみが大きく、

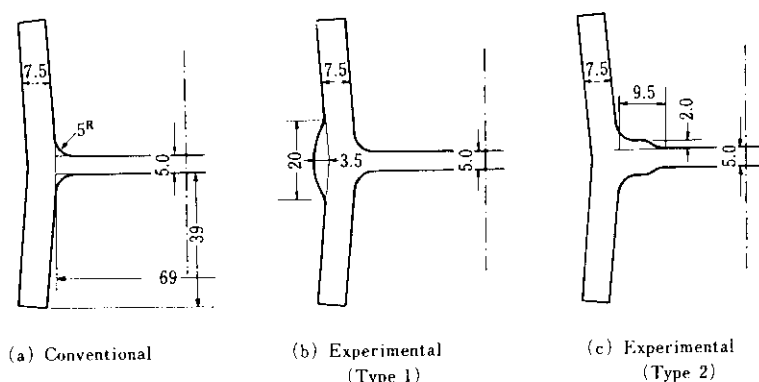


Fig. 2 Material profile of plasticine model in the case of using one roughing universal mill

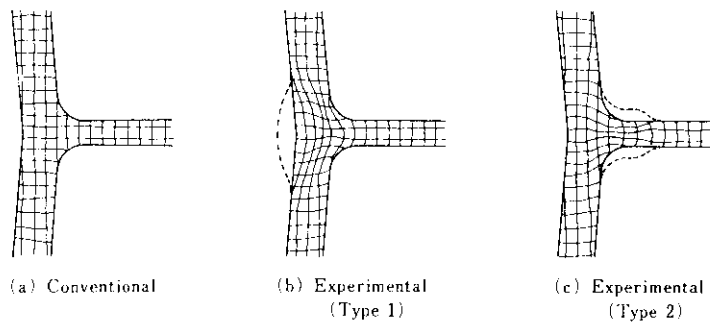


Fig. 3 Metal flow in fillet part by plasticine model

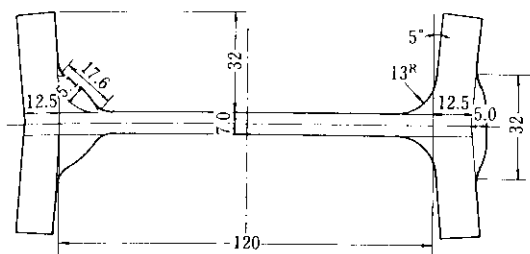


Fig. 4 Material profile of plasticine model in the case of using two roughing universal mill

R部内側凸形状から外側凸形状への圧延ではウェブ側R止まり近傍のひずみが大いことがわかった。

なお両法のプラスチシンモデル実験の範囲では圧延に障害はなく、凸部の圧下による折れ込み疵の発生はなかった。

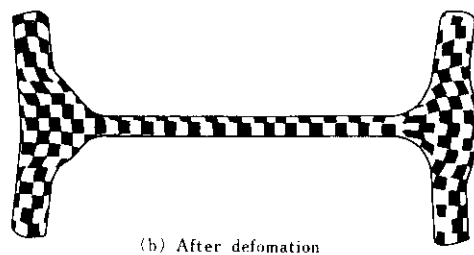
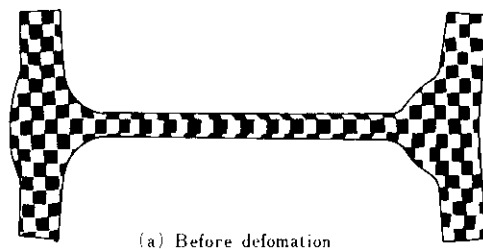


Fig. 6 Metal flow of plasticine model in Fig. 4

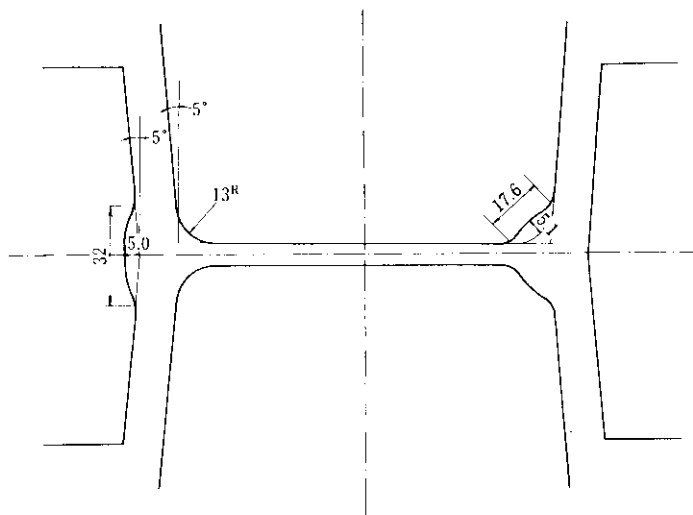


Fig. 5 Roll profile for rolling plasticine model shown in Fig. 4

3. 実機による実験方法

再結晶、析出などの金属組織学的挙動が単純なAlキルド鋼を用いて、H形鋼R部の材質改善を目的とした実機実験を以下のように実施した。

3・1 供試材

U_Rミル1期の場合には製品サイズ300×300×10×15(ウェブ高さ×フランジ幅×ウェブ厚×フランジ厚mm)で、U_Rミル2基の場合には294×200×8×12で実験を行った。供試材はどちらも商用鋼でその成分をTable 1に示す。

3・2 圧延条件

当社水島製鉄所大形工場では300×300材を、中形工場では294×200材の実験圧延を行った。圧延条件を次のように設定した。①加熱温度は1250℃、②BDミル圧延温度はミル能力の点から1100℃以上、③U_Rミルの前半圧延温度はオーステナイト

粒成長の抑制される1100℃以下、④U_R前半圧延終了後に材料を所定温度まで待機させた後、コントロールドローリングを行い、仕上り温度を960～770℃と変動させる。また圧延条件の詳細をTable 2に示す。300×300材でのU_Rミル縦ロールの孔型形状はプラスチックモデル実験からFig. 7に示すものとした。孔形の深さを10mmにしたことにより、R部のU_Rミル全パスでの圧下率は76.0%と通常圧延(85.1%)より減少するが、オーステ

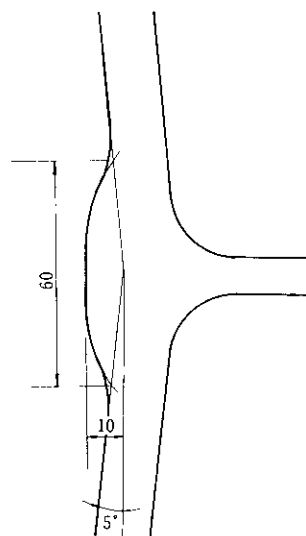


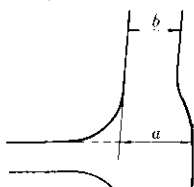
Fig. 7 Experimental U_R vertical roll profile for 300×300 material

Table 1 Chemical composition of steels tested (%)

Size	C	Si	Mn	P	S	Al
300×300×10×15	0.16	0.16	0.76	0.020	0.011	0.028
294×200×8×12	0.13	0.19	0.74	0.023	0.008	0.024

Table 2 Rolling conditions at actual mill

Size	No.	U _R roll	U _R pass number	Holding	Reduction (flange/fillet)					Temperature	
					Thickness (mm)		Reduction (%)			Heating	Finishing at fillet
					After BD	Before CR	P	U _R	CR total		
300×300	1	Conventional	11	After 8 passes	90/110	27.9/27.9	15/15	69/75	46/46	1250	960 770
	2	Experimental	11	After 8 passes	90/110	27.9/37.9	15/15	69/66	46/60		
	3	Experimental	11	Before U _F	90/110	16.4/26.4	15/15	82/76	9/43		
294×200	4	Conventional	3	After 2 passes	56/64	23.0/23.0	12/12	59/64	48/48	1250	950 780
	5	Experimental	3	After 2 passes	56/64	23.0/31.0	12/12	59/52	48/61		
	6	Experimental	5	After 2 passes	56/64	23.0/31.0	12/12	59/52	48/61		



BD: Break down mill
 U_R: Universal rougher mill (high temperature)
 CR: Controlled rolling
 P: Product
 a: Thickness of fillet
 b: Thickness of flange

ナイト再結晶領域で加工再結晶によりオーステナイト粒を微細化するための圧下率としては十分である。また U_F ミルでの圧下率は通常の 8.5% より 43.2% と増加する。従来のコントロールドローリング実験の結果では低温圧延を実施する合計圧下率が 31~45% の範囲ではほぼ同程度の材質改善効果が得られており⁴⁾、前記の R 部の U_F ミルにおける圧下率はウェブへのメタルフロー等により若干減少するとしても十分な材質改善が期待できる量である。294×200 材での U_1 ミル水平ロール、 U_2 ミル縦ロールの孔型形状を Fig. 8 に示す。 U_1 、 U_2 での凸部の充満を確保するため、 U_1 、 U_2 の孔型の面積はほぼ同一となるようにした。また U_2 ミルの縦ロールの孔型の深さは U_F ミルでの R 部の圧下率が 42.4% となるよう 8mm に設定した。また 300×300 材では U_F ミルでの低温集中強圧下の効果を見るため、 U_F ミル前面で待機させる圧延も行った (Table 2 実験 No. 3 参照)。294×200 材では、 U_R での往復パス回数増大による剪断変形の効果をみるため、 U_R 最終パスの圧下率を 3 等分してパス回数を増加させ、同様にコントロールドローリングを行った (Table 2 実験 No. 6 参照)。

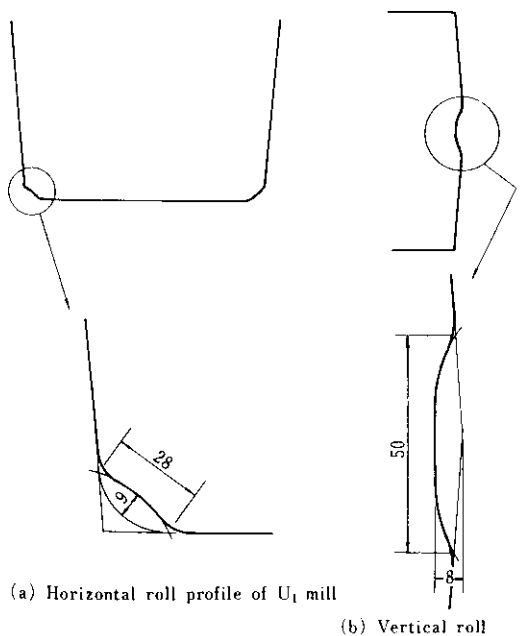


Fig. 8 Experimental U_R roll profile for 294×200 material

3.3 調査項目および方法

3.3.1 試験材採取位置

各試験材は Fig. 9 に示すフランジ、R 部から圧延方向に採取した。

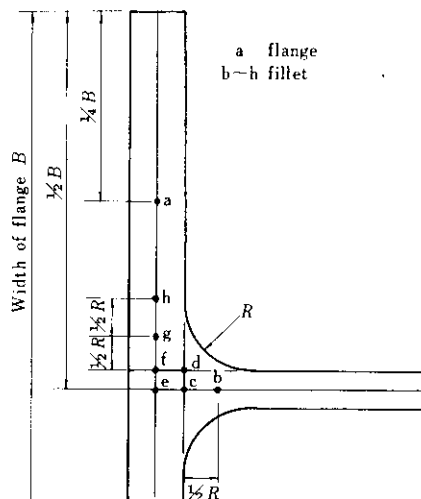


Fig. 9 Sampling positions of longitudinal test pieces in a cross section of H-shapes

3.3.2 試験項目

引張試験 (5mmφ×平行部長さ50mm)、2mmV ノッチシャルピー試験 (7.5mm×10mm サブサイズ) および顕微鏡組織観察を行った。

4. 実験結果

4.1 板厚変化と温度低下

圧延中の R 部・フランジ部の板厚変化と温度の関係を Fig. 10 に示す。この図の (a) は Table 2 の実験 No. 3 に、(b) は No. 5 に相当する。

4.2 R 部の材質改善

通常ロールと実験ロールによる材質変化の差をみるため 300×300 材の通常ロールを用いた実験 No. 1 および実験ロールを用いた No. 3 について、下部降伏点 (L.Y.P.)、脆性延性破面遷移温度 (Trs) と R 部の仕上り温度の関係を Fig. 11 に示す。通常

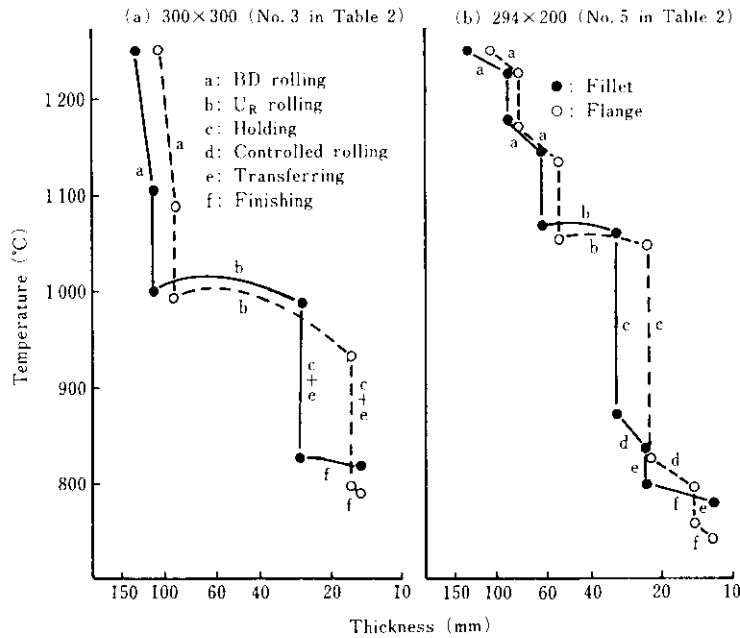


Fig. 10 Relation between rolling temperature and thickness of fillet and flange

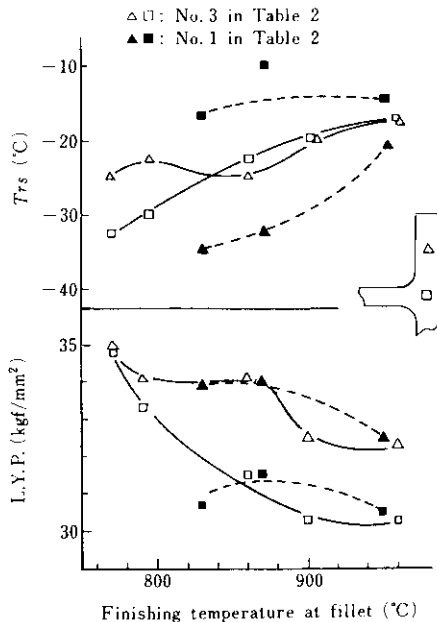


Fig. 11 Relation between finishing temperature and mechanical properties (300x300)

ロールでコントロールドローリングした No. 1 の場合にはフランジの材質のみが改善され、仕上り温度が低下するにしたがって R 部とフランジ部の差が広がるのに対し、実験ロールで U_F の圧延温度を低下させた No. 3 ではフィレット部の材質改善効

果も顕著になり、フランジなみ、あるいはそれ以上に向上している。同様に実験 No. 2 について、L.Y.P., T_{rs} と R 部の仕上り温度の関係を Fig. 12 に示す。 U_R の後半パスでコントロールドローリン

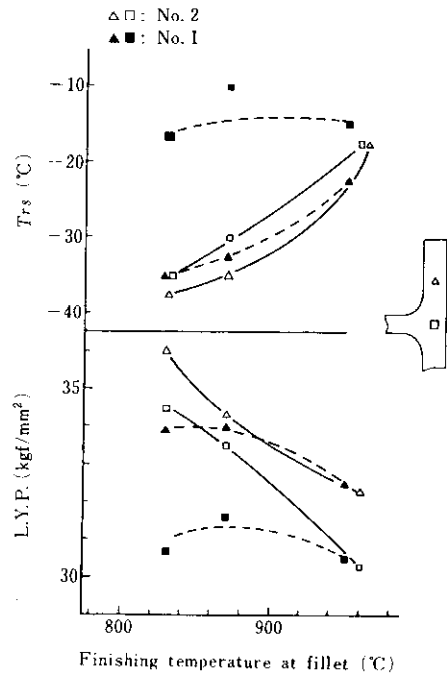


Fig. 12 Relation between finishing temperature and mechanical properties (300x300)

グすることにより No. 3 にくらべてフランジ部の材質が改善され、R 部・フランジ部がほぼ同程度の数値を示すようになっている。

また 294×200 材において、実験ロールを用いた No. 5 と通常ロールを用いた No. 4 についての L.Y.P., T_{rs} と R 部の仕上り温度の関係を Fig. 13 に示す。300×300 材と同様に実験ロールによる R 部の材質改善の効果が明瞭に認められる。

次に U_R ミルでのくりかえし変形回数の効果を見るため、実験ロールを用いて U_R のパス回数を 3 パスから 5 パスにふやした実験 No. 5 および No. 6 の L.Y.P., T_{rs} と U_R 最終パス直前の温度の関係を Fig. 14 に示す。 U_R のパス回数を増加させることにより R 部の材質はさらに改善され、特にウェーブ側 R 止まりの材質が大幅に向上していることがわかる。

5. 考 察

5.1 R 部ひずみ量の評価方法

本実験の狙いは R 部板厚方向に 1 パスで集中強

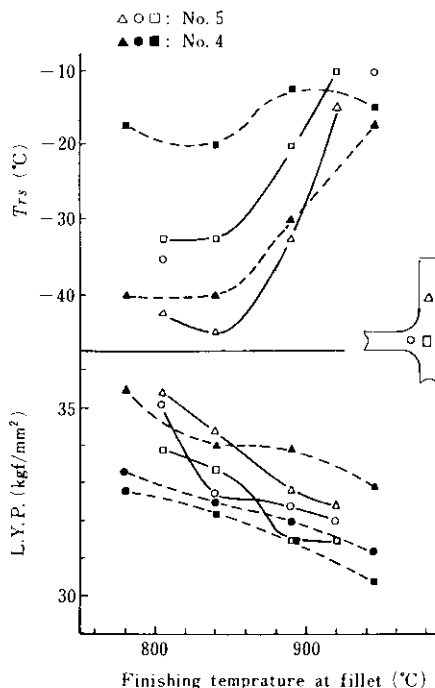


Fig. 13 Relation between finishing temperature and mechanical properties (294×200)

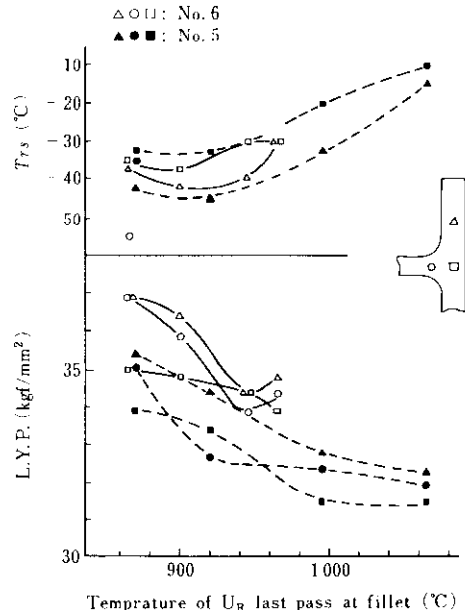


Fig. 14 Relation between temperature of U_R last pass and mechanical properties (H 294×200)

圧下し、剪断変形を導入して組織改善を図ることである。そこで圧下率や剪断変形の増大が組織改善に結びつくような一定尺度のひずみ量として評価しうるように Von Mises の降伏条件による相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^{(2)}$ (1 式) を採用した。

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2 + 2\gamma_{xy}^2 + 2\gamma_{yz}^2 + 2\gamma_{zx}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$\bar{\epsilon}$: 相当塑性ひずみ

ϵ_i : i 方向の圧縮ひずみ

γ_{ij} : ij 方向の剪断ひずみ

(1) 式は複雑なひずみをそれと同等の剪断ひずみエネルギーをもつ単軸圧縮ひずみに置き換えるという考え方によるものであり、今回のように変形後の組織変化を解析するには適当であると考えられる。

圧延前に直交している格子が Fig. 15 のように変形した場合、それらの変形後の形状が平行四辺形であり、長さ方向には一様に伸びると仮定すれば、相当塑性ひずみは次式で計算できる。

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ \left(\ln \frac{x_0}{x} \right)^2 + \left(\ln \frac{y_0}{y} \right)^2 + \left(\ln \frac{z_0}{z} \right)^2 \right\}$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\tan \theta \right)^2 \}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (2)$$

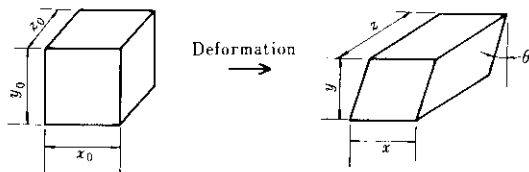


Fig. 15 Deformation of cube

プラスチックモデル実験で断面の格子模様の変形より観察されたメタルフローから実機形状に修正して各格子位置での相当塑性ひずみを計算した結果を Fig. 16 に示す。この図よりタイプ I の圧延ではウェブ側 R 止まり近傍にひずみ量のピークがあり、タイプ II およびタイプ III の圧延ではフランジ側 R 止まり近傍にひずみ量のピークがあること、タイプ III ではタイプ I, II よりも R 部全体にひずみ量の増加がみられることがわかる。全般的に本実験による R 部のひずみ量の増加は剪断ひずみの増加によるものである。

5・2 ひずみ量と材質改善との関連

R 部各位置のひずみ量とフェライト粒微細化量 (JIS 粒度番号の増加量) の関連を Fig. 17 に示す。ひずみ量としては、300×300 材では U_F ミル 1 パスで加えられるものを採用し、294×200 材では材料温度が 900℃ 以下のパスでの合計ひずみ量を使用している。結晶粒微細化量については、通常ロールと実験ロールで低温域圧延したものの各々か

ら JIS 粒度番号を求めその差を算出している。図から明らかなように R 部各位置におけるひずみ量と微細化量は同じ傾向で変化しておりひずみ量が増えると結晶粒の微細化が進行する。

Fig. 18 は Ar_3 変態点以上の温度域での低温域圧延と高温域圧延におけるひずみ量と微細化の関係をみたものである。この図からひずみ量と微細化はほぼ直線関係があり、低温域圧延でとくに効果が顕著であること、高温域圧延ではあまり有効でないことがわかる。この原因は圧延温度にあり、低温ほど付与するひずみ量が微細化に寄与するのである。よって低温域で R 部のひずみ量を増

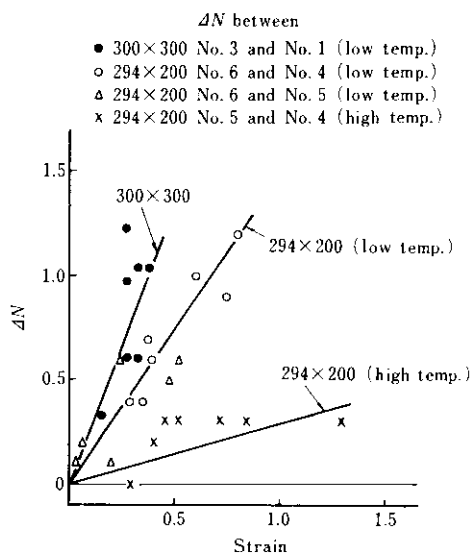


Fig. 18 Effect of strain on the increase of grain size number of JIS

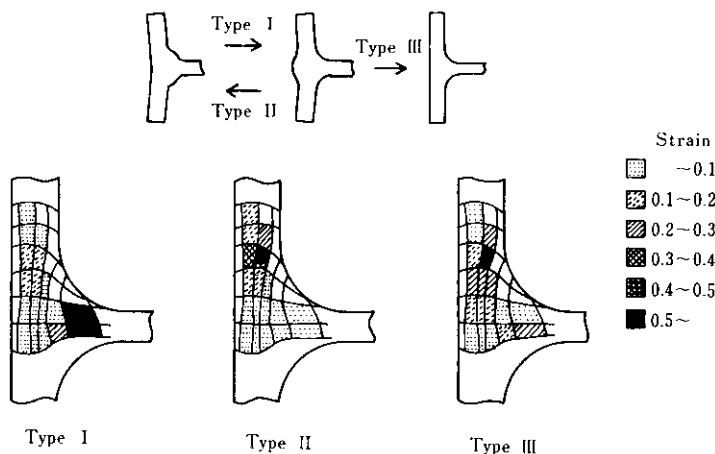


Fig. 16 Equivalent plastic strain distribution in fillet

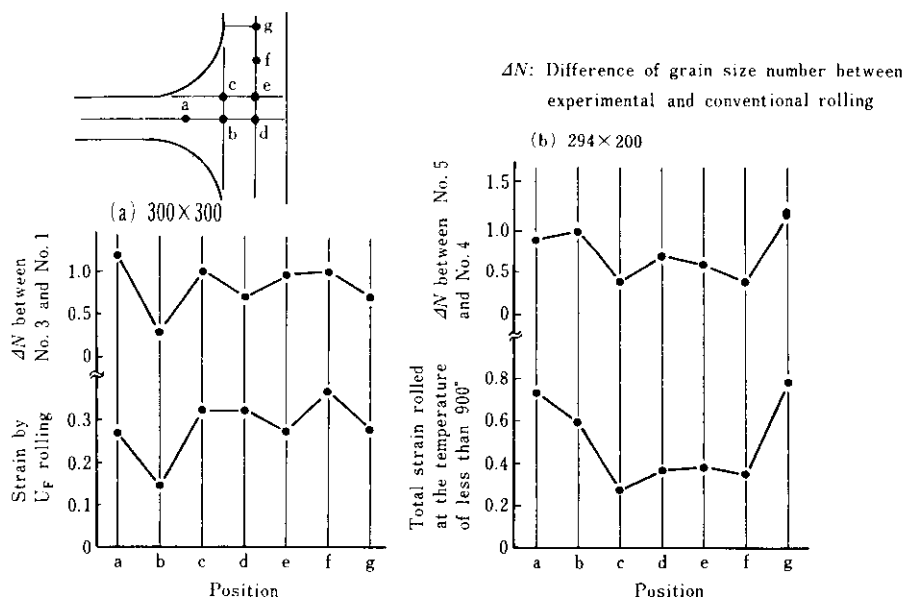


Fig. 17 Relation between strain and increase of grain size number of JIS at each position

加させることにより、その材質が改善され、その改善量は付与されたひずみ量で評価できる。

6. モデル実験

ひずみ量と微細化の関係を確認するためモデル実験を行った。

6・1 実験方法

供試材は 300×300 の実験材と同一溶鋼の素材から 25×25×25mm のブロックを切り出し、焼ならし (930℃×1h) したものである。これを所定の温度 (1200℃, 950℃) に加熱した後に 100t 圧縮試験機により 850℃~750℃ の加工温度で 10~70% の圧縮を 1 ストロークで加えた。

6・2 実験結果および考察

ひずみ量とフェライト粒度番号 (JIS) の関係を Fig. 19 に示す。ひずみ量は圧縮前後の試験片の厚みを実測して求めた。組織観察の位置は圧延材の L 断面と対応するように圧下面に垂直な断面の板厚中心とした。実験結果を以下に示す。

(1) 950℃ 加熱のものうち 850℃, 800℃ 加工のものはほぼ同一の微細化傾向を示し、ひずみ量の増加に対して直線的に粒度番号が増加する。

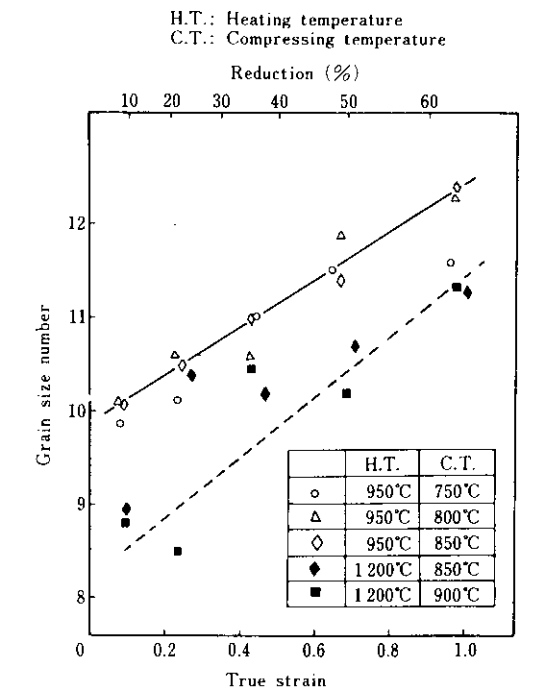


Fig. 19 Relation between strain and ferrite grain size by model compression experiment

(2) 950℃ 加熱で 750℃ 加工のものはすでに オーステナイト+フェライトの 2 相域にはいっており、フェライト粒が変化しているため粒度番号のバラツキが大きい。

(3) 1200°C加熱のものは加工前にオーステナイト粒が粗大化しているため、加工後の組織は混粒となっており粒径のバラツキは大きい。また950°C加熱のものと比較するとひずみ量増加に対する粒度番号の増加が幾分大きい。

実機圧延の場合、加熱温度は1230°Cであるが、粗ユニバーサル圧延によりある程度オーステナイト粒が微細化されていることおよび制御圧延をオーステナイト非再結晶領域で行っていることより実機データとの比較には950°C加熱で850°C、800°C加工のデータを使用するのが妥当であると思われる。

実機実験とモデル実験の結果を比較したものをFig. 20に示す。U_F 1パスで集中強圧下した300

×300材の結果はモデル実験結果とほぼ同一である。U_Rでくり返し変形させた後U_Fで集中強圧下した294×200材ではひずみ量の効果が小さい。これはモデル実験が1ストロークで与えたひずみ量であるのに対し、実機圧延では数パスにおけるひずみ量を単純に加算したものであり、その効果がそのまま累積しないためであろう。

7. 結 論

H形鋼R部の材質を改善し断面内で均一化するため、ユニバーサルミル圧延時にこの部分の変形状態をかえる実験を行い、ひずみ量との関係を調査した結果以下のことがわかった。

- (1) U_R圧延でR部外側に凸部を形成し、U_Fミルで低温集中強圧下することにより、R部の組織材質は著しく改善される。
- (2) 2基以上の連続した粗ユニバーサルミル群でR部内側と外側を交互に凸状とし低温で往復圧延することでこの部分の材質は大幅に向上する。
- (3) プラスチシンモデルミルでの格子模様の変形から、Von Misesの降伏条件により計算した相当塑性ひずみとフェライト粒の微細化とはよく対応する。
- (4) 素材と製品の寸法が決っていてもその圧延過程においてオーステナイト非再結晶領域で集中強圧下やくりかえしの剪断変形を与えることにより、その組織や材質を改善できる。

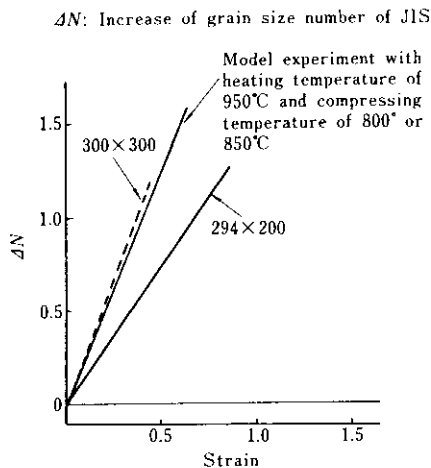


Fig. 20 Comparison between model experiment and actual experiment of the strain effect on grain size increase

参 考 文 献

- 1) 中西, 荒木, 入見, 小林: 川崎製鉄技報, 8 (1976) 2, 204
- 2) 山田: 塑性力学, (1974), 76, (日刊工業新聞社)