

© 1990 ISIJ

論 文

極低炭素冷延鋼板の r 値におよぼす
冷延条件の影響

橋本 俊一*・薬師寺輝敏*2・前田 恭志*3

Effect of Rolling Condition on r -value of Extra-low-carbon Cold Rolled Steel Sheet

Shunichi HASHIMOTO, Terutoshi YAKUSHIJI and Yasushi MAEDA

Synopsis :

The effect of metallurgical factors on the r -value of cold rolled steel sheet has been reported by many researchers. However the number of reports with regard to the mechanical factors on the r -value is quite few. In this study, the effects of roll diameter, thickness of the steel and reduction per pass on the r -value of extra low carbon cold rolled steel sheet has been examined and discussed using the results obtained by rigid finite element method.

(1) r -value of cold rolled and annealed steel sheet increases with increase in roll diameter and decrease in initial thickness at the cold rolling.

(2) When the changes in thickness and reduction per pass during continuous cold rolling are considered, r -value shows a good relationship with the sum of {Roll diameter (D_i)/Thickness (t_{mi})} and cold reduction of each pass.

(3) The decrease in r -value with decrease in {Roll diameter (D)/Initial thickness (t_0)} relates with the increase in shear strain in the surface region of the sheet. That is, the deterioration of r -value with decrease in this parameter is brought about by formation of the unfavorable texture in surface region for deep drawability originated by shear strain.

Key words : r -value ; cold rolled steel sheet ; roll diameter ; cold rolling ; extra low carbon steel ; texture ; rigid finite element method.

1. 緒 言

冷延鋼板の集合組織や r 値におよぼす固溶元素や析出物, あるいは熱延条件, 冷延圧下率の影響については過去膨大な研究報告があり, 定性的には大略理解できているものと考えられるが, 圧延時のロール径, 板厚, 1パス当たりの圧下率, 潤滑条件などの影響については十分な議論が成されてきたとは言えない。最近佐柳ら^{1)~4)}や田中ら⁵⁾は r 値におよぼす冷延時のロール径などの影響を検討し, ロール径が大きいほど r 値が向上し, その変化は板厚方向の集合組織変化と対応することを示している。また潤滑条件の影響については古林ら⁶⁾や松藤ら⁷⁾の研究や近年盛んに行われているフェライト域熱延に関する研究の中^{8)~10)}でかなり明確になってきた

が, これらの因子の影響に関する研究は大きく遅れているといわざるを得ない。このような背景のもとで本報告では冷延鋼板の r 値におよぼすロール径, 板厚などの影響を圧延実験により明確にし, さらに有限要素法による鋼板の圧延変形解析を行い現象の解明を行った。

2. 実験方法

供試材は真空溶製した 0.0035% C-0.12% Mn-0.001% P-0.0084% S-0.03% Al-0.11% Ti (wt%) の成分の極低炭素 Ti 添加鋼である。

冷間圧延の実験にはオーステナイト域で熱延終了後, 700°C の炉に 1 h 保持, 炉冷することにより炭化物の析出処理を施して固溶炭素量をゼロにした熱延鋼板を用いた。これは r 値に大きな影響をおよぼす固溶炭素の影

昭和 63 年 4 月本会講演大会にて発表 平成元年 4 月 14 日受付 (Received Apr. 14, 1989)

* (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*2 (株)神戸製鋼所鉄鋼技術研究所 (現: 大分高等専門学校) (Iron & Steel Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., Now Oita National College of Technology)

*3 (株)神戸製鋼所機械研究所 (Mechanical Engineering Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd.)

響を排除し本論文の主題とする冷延時の各種因子の影響を純粹に抽出するためである。ロール径の影響を検討する場合には、初期板厚を 4.5 mm 一定とし、ロール径を 50, 100, 200, 300 および 500 mm と変化させて圧延した。また板厚の影響を検討する場合にはロール径を 100 mm 一定とし、研削により初期板厚を 1.13 から 6.75 mm まで変化させた。1パス当たりの圧下率の影響は1パス当たり約 4%, 17%, 35% の一定の圧下率で冷延を行う3条件で検討した。それぞれの圧延回数は 30 パス, 7 パス, 3 パスとなる。基本的な全冷延圧下率は 73% としたが、一部試料については全冷延圧下率の影響を検討するため 94% までの範囲で圧下率を種々変化させた。潤滑剤には 5% 牛脂油を用いた。これらの圧延材に $750^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ の真空焼鈍を施し、 r 値もしくは X 線による極密度測定により集合組織解析を行った。極密度については、圧延面に平行に存在する低指数面の回折強度の測定を行い、ランダム試料との強度比を求め、 $I(222)$, $I(200)$ などと表現した。

計算機による鋼板圧延変形解析は、剛塑性有限要素法によって板厚方向を 10 等分に分割して行った。

3. 実験結果および考察

3.1 ロール径の影響

冷延前の初期板厚を 4.5 mm とし、ロール径を変化させた場合の r 値の変化挙動を Fig. 1 に示す。ロール径が 50 mm でかつ 1パス当たりの圧下率が 4.2% の場合に r 値が 1.62 と特に低い値となっているが、それを除くとロール径の増大とともに r 値は向上し、300 mm の

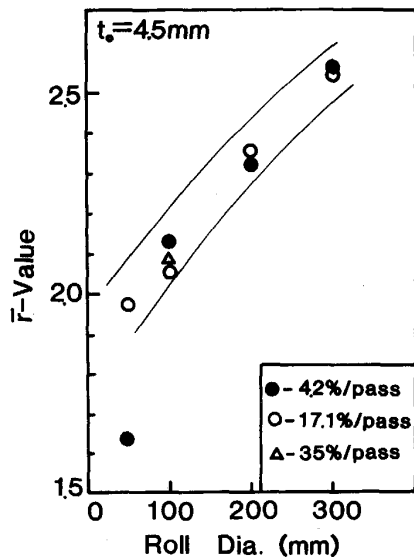


Fig. 1. Effects of roll diameter and reduction per pass on r -value (Initial thickness : 4.5 mm).

場合には 2.5 に達する。またロール径が 100 mm 以上では 1パス当たりの圧下率の変化にともなう r 値の変化は見られずその影響は小さい。

Fig. 2 に Fig. 1 に示した結果の中で、1パス当たりの圧下率が 17.1% の場合の鋼板表面部と中心部の極密度変化を示した。中心部の極密度におよぼすロール径の影響は小さいが、ロール径の減少とともに $I(222)$ がやや減少し、 $I(200)$ がやや増加する傾向にある。いっぽう表面部の変化は顕著であり、ロール径の減少とともに著しい $I(222)$ の減少、 $I(200)$, $I(110)$ の増加が認められる。この結果からロール径の減少にともなう r 値の低下は、第 1 にロール径の減少とともに表層部に高 r 値を得るに適さない集合組織が発達すること、第 2 に板中心部の集合組織もわずかではあるが変化することによってわかる。

3.2 初期板厚の影響

ロール径を 100 mm 一定とし、初期板厚を 2 mm から 6.75 mm に変化させた場合の r 値の変化を Fig. 3 に示す。 r 値は初期板厚の増加とともに 2.35 から 2.0 に低下する。この場合には 1パス当たりの圧下率の影響は認

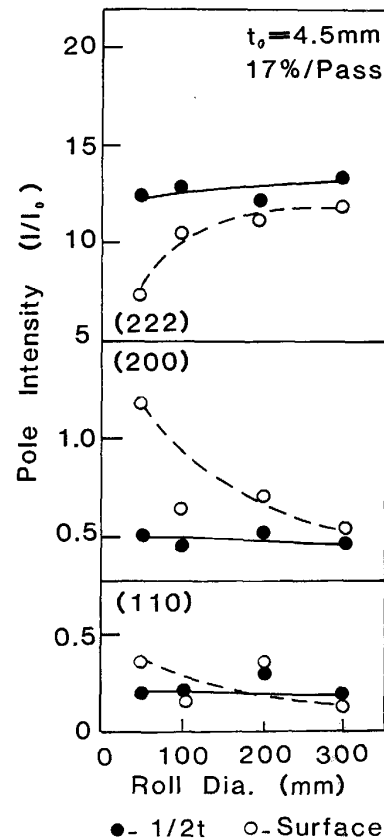


Fig. 2. Effect of roll diameter on pole intensity of surface or center of steel sheet (Initial thickness : 4.5 mm).

められない。

Fig. 3 に示した結果の中で、1パス当たりの圧下率が17.1%の場合の鋼板表面部と中心部の極密度変化をFig. 4 に示した。中心部、表面部とも初期板厚の変化とともに極密度変化が認められ、初期板厚の増加とともに $I(222)$ が減少し、 $I(200)$ 、 $I(110)$ が増加する傾向にある。この結果はロール径の変化にともなう r 値の変

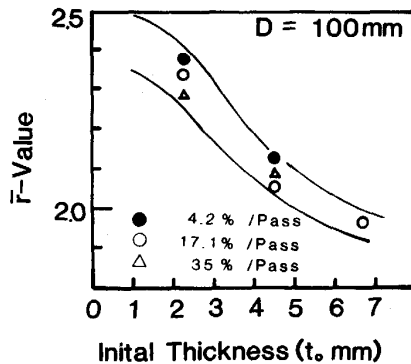


Fig. 3. Effects of initial thickness and reduction per pass on r -value (Roll diameter : 100 mm).

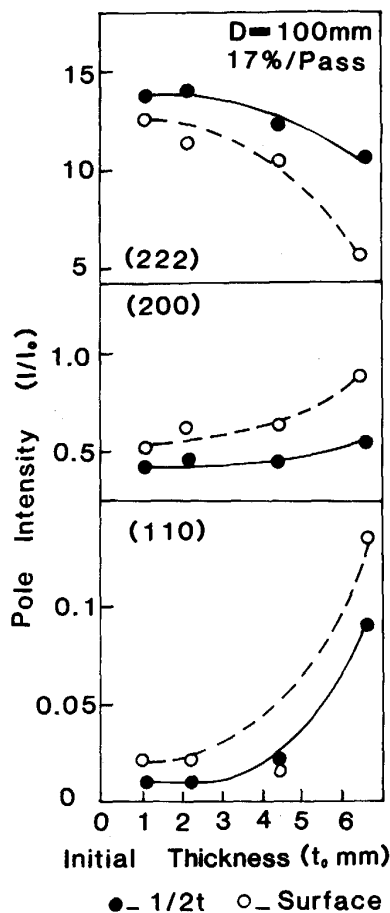


Fig. 4. Effects of initial thickness and reduction per pass on pole intensity (Roll diameter : 100 mm).

化と同様、初期板厚の増加にともなう r 値の低下は表層部に高 r 値を得るに適さない集合組織が発達することと、板中心部の集合組織そのものも劣化するためであると考えられる。

3.3 圧延解析結果

圧延方向を X 軸、板厚方向を Y 軸にとり、剛塑性有限要素法により、圧延により鋼板中に生ずるせん断ひずみ量(ϵ_{xy})および板厚方向ひずみ量(ϵ_y)におよぼすロール径、初期板厚の影響を解析した。Fig. 5 に初期板厚を3.0 mm一定としロール径を100, 200, 300 mmと変化させたときの、またFig. 6 にロール径を100 mm一定とし初期板厚を1 mmから5 mmまで変化させたときの板表面部および中心部のせん断ひずみ量、および板厚方向ひずみ量の変化を示す。いずれの場合もせん断摩擦係数0.1、圧下率35%の1パス圧延を想定して計算した。板表面部のせん断ひずみ量はロール径の減少にともない0.04から0.11に増加し、初期板厚の増大にともない0.03から0.19に増加する。いっぽう板厚中心

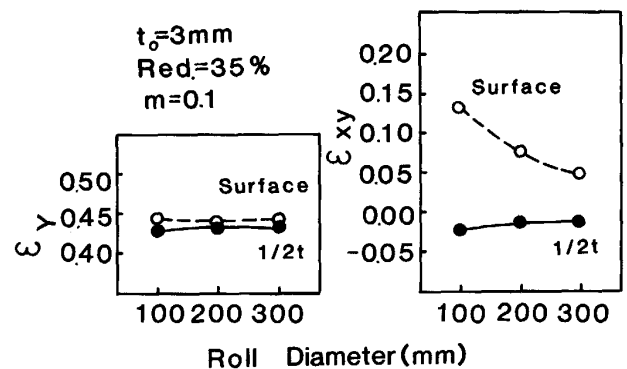


Fig. 5. Effect of roll diameter on shear strain (ϵ_{xy}) and strain of thickness direction (ϵ_y) calculated by rigid finite element method (m is shear friction coefficient).

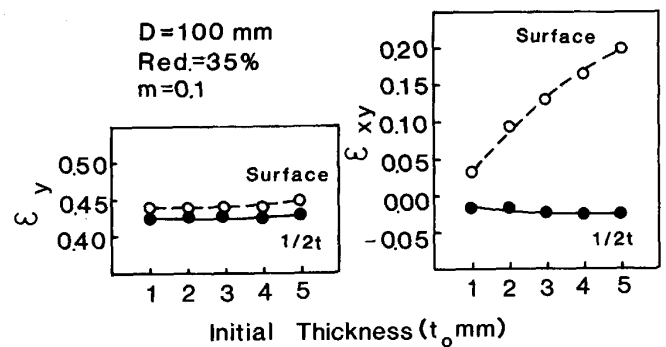


Fig. 6. Effect of initial thickness on shear strain (ϵ_{xy}) and strain of thickness direction (ϵ_y) calculated by rigid finite element method (m is shear friction coefficient).

部ではその変化は小さく、ロール径の減少、初期板厚の増大にともないそれぞれ約 0.01 減少する程度である。板厚方向ひずみ量の変化についてはせん断ひずみ量の変化ほど大きいものではない。

3.4 圧下率の影響

冷延鋼板の r 値は圧下率の影響を顕著に受けることはよく知られており、先に示した r 値の結果は必ずしもその材料の持っている最高の値を示したものではない。ここでは初期板厚を 10 mm 一定とし、ロール径が 300, 500 mm の場合について、圧下率を最大 94% まで変化させた場合の r 値の変化挙動を調査した。その結果を Fig. 7 に示す。ロール径が 500 mm の場合には r 値の圧下率依存性が小さく、低圧下率でも高 r 値が得られているが、300 mm の場合には圧下率依存性が大きく、低圧下率での r 値は大径ロールの場合に比べて低い。なお両者で最高の r 値には差は無く、いずれも 2.5 程度である。面内異方性は全冷延圧下率 75% では大径ロールの方が高 r 値にもかかわらず小さい。いずれのロール径の場合でも圧下率の増加とともに 45° 方向の r 値 (r_{45}) が最小値を示し、 $r_{45} < r_0 < r_{90}$ の順位となる V 字型の面内異方性が小さくなり、ピーク値を示す 90% 程度で $r_0 < r_{45} < r_{90}$ の直線状の面内異方性となり、それを超えると r_{45} が最大値を示す逆 V 字型となる通常見られる変化傾向を示すが、小径ロールの方が同等

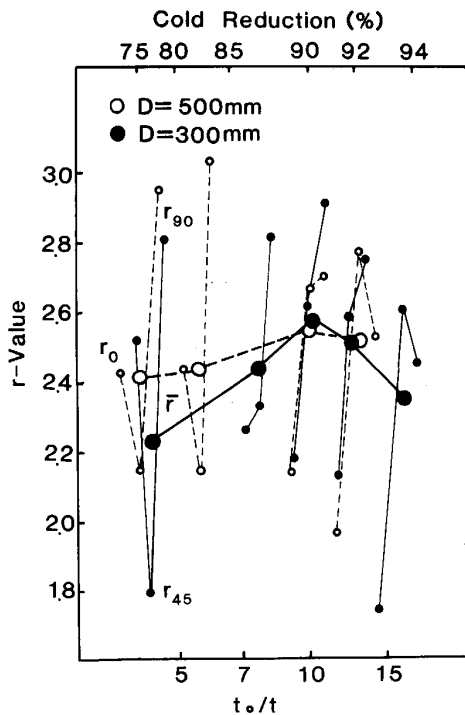


Fig. 7. Effects of cold reduction and roll diameter on r -value.

の r 値を得るのに高い圧下率を必要としている。このことは同じ圧下率でも小径ロールでは圧延集合組織の形成に寄与するところが小さいことを意味しているものと考えられる。面内異方性の差についてはこの圧延集合組織形成に寄与する圧下率の差異と板表面部でのせん断集合組織の生成の差異の両者が関与しているものと思われる。

3.5 圧下率 73% の場合の r 値におよぼす冷延条件の影響

ロール径や初期板厚を種々変えて圧延したときの r 値の変化を調査し、ロール径が大きいほど、また初期板厚が小さいほど高い r 値が得られることを示した。ロール径、初期板厚の影響は幾何学的に考えると、まったく同じことを示すものである。そこで無次元パラメーターとしてロール径/初期板厚 (D/t_0) を導入し、Fig. 1 および 3 に示したデータを用いて r 値の整理を行った。その結果を Fig. 8 に示す。その結果 r 値は D/t_0 とよい対応を示していることがわかる。ただしロール径が 50 mm でかつ 1 パス当たりの圧下率が 4.2% のデータのみ他のデータからはずれ、著しく低い値を示している。このように極端にロール径が小さい場合¹⁾ や、1 パス当たりの圧下率の低い場合²⁾³⁾⁵⁾¹¹⁾ に r 値が低くなることはこれまでにも報告されているところであるが、いずれも板厚方向への圧縮変形が生じにくくなるためと思われる。本実験においても D/t_0 との関係からはずれるのは両要因の重なった極端な場合のみであり、また実際の高 r 値冷延鋼板製造プロセスの連続冷間圧延においてはこのような条件で圧延されることは無いので、この現象の深い考察は差し控える。

一部試料について板表面部と中心部の r 値ともっと

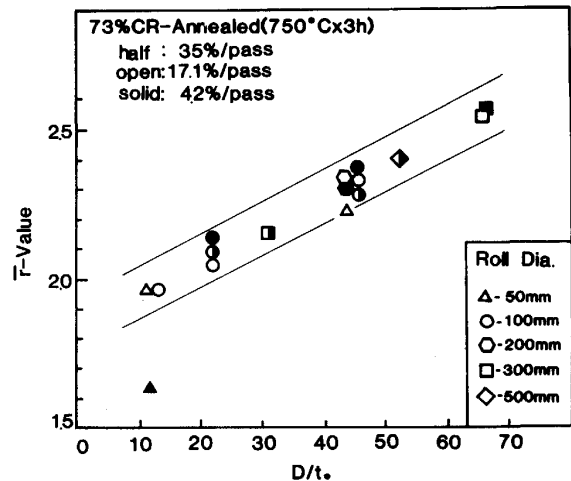


Fig. 8. Effect of {Roll diameter (D)/Initial thickness (t_0)} on r -value.

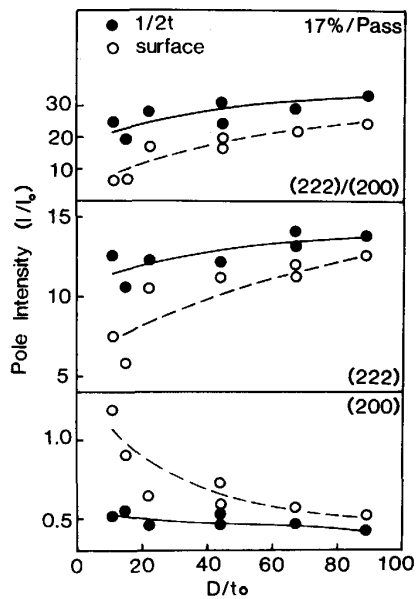


Fig. 9. Effect of {Roll diameter (D)/Initial thickness (t_0)} on pole intensity.

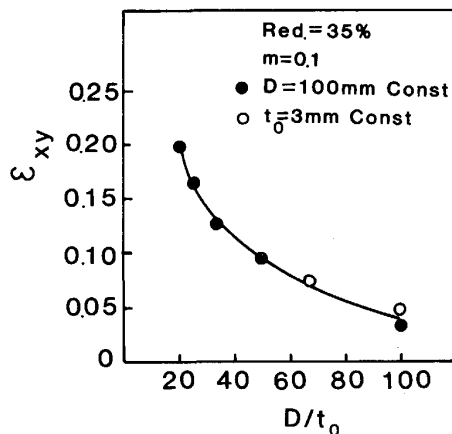


Fig. 10. Effect of {Roll diameter (D)/Initial thickness (t_0)} on shear strain (ϵ_{xy}) of surface region (m is shear friction coefficient).

も関係の強い $I(222)$, $I(200)$ を測定し、同様なパラメーターで整理し Fig. 9 に示した。板中心部、表層部とも D/t_0 の増加にともない、 $I(222)$ の増加、 $I(200)$ の減少が認められ、 $I(222)/I(200)$ の変化傾向は r 値のそれと良い対応が認められる。この結果から r 値が D/t_0 により変化する原因としてこれまで述べてきたように、表面部のせん断加工にともなうせん断集合組織の発達が必要な役割を果たすことはもちろんのこと、板中心部における集合組織の変化も重要な要素であることがあげられる。

D/t_0 の減少にともなうせん断ひずみ量 (ϵ_{xy}) の増加は Fig. 5, 6 に示した圧延解析データを再整理した

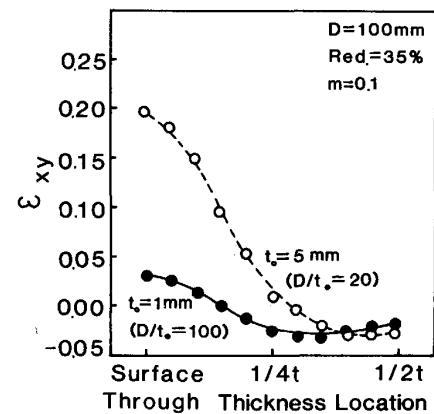


Fig. 11. Effect of initial thickness on shear strain (ϵ_{xy}) of thickness direction (m is shear friction coefficient).

Fig. 10 から明らかである。佐柳ら¹⁴⁾ や山田¹¹⁾ によるロール径の小径化にともなう r 値の低下は表面部での深絞り性に好ましくない集合組織の発達にあるという結論は本実験結果においても支持されるが、さらにその成因として圧延時のせん断ひずみの増加にともなうせん断集合組織の発達にあることが明らかである。Fig. 11 には板厚方向のせん断ひずみ量の変化におよぼすロール径および初期板厚の影響の解析結果を示す。初期板厚が大きい場合にはこれまで述べたように表面部でのせん断ひずみ量が大きだけでなく板内部に向かっての分布にも影響をおよぼし、総合結果として大きな差になっていると考えられる。さらにこれまでほとんど考慮されていなかったが、本結果では板中心部での集合組織の変化そのものも重要な影響を持っていることが明らかとなった。圧延解析の結果からは、この成因を十分に証明することはできないが、 D/t_0 の減少にともなう板厚方向ひずみ量の減少により、見かけ上低下率の圧延が施されたと同等の状況となり、 r 値が低下したものと考えられる。これは Fig. 8 に示したように、ロール径が小さくとも圧下率を増加させることにより、大径ロールで圧延したものと同等の r 値、面内異方性が得られていることから推定される。

3.6 圧下率を変化させた時の r 値におよぼす冷延条件の影響

圧下率が 73% の場合、冷延-焼鈍後の r 値が D/t_0 で一義的に整理できることを 3.5 で示した。これ以外の圧下率の場合でも圧下率が一定であれば D/t_0 で整理できることは容易に推測できるが、圧下率が異なる場合には同一の D/t_0 であっても r 値は変化するので、Fig. 8 に示した r 値と D/t_0 の関係は冷延率の変化により異

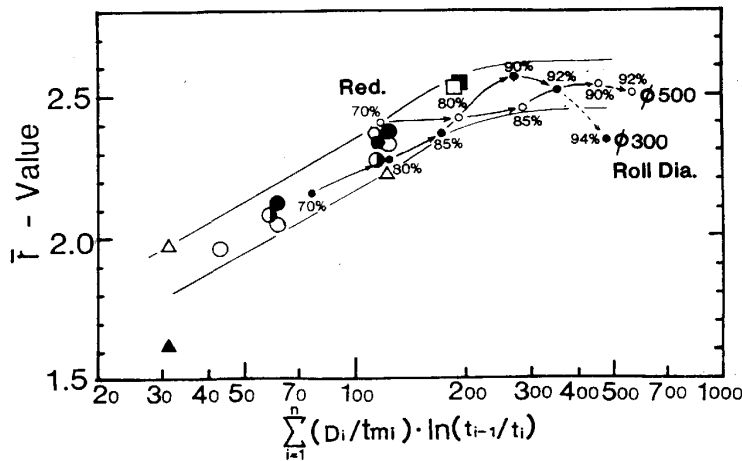


Fig. 12. Effect of sum total of {Roll diameter (D_i)/Thickness (t_{mi})} and cold reduction of each pass on r -value.

なってくる。実際の連続冷間圧延を考えた場合、このような全冷延圧下率の相違だけでなくパスごとの圧下率、板厚、ロール径なども変化している。したがってこのような変化に対応しうる考え方を構築する必要がある、以下にその考え方を示す。

通常本実験に用いたような極低炭素 Ti 添加鋼においては r 値の最大値は 90% 程度の圧下率で得られる。 r 値が問題となる冷延鋼板の製造工程において、90% を超える圧下率の冷延を施すことはまず考えられないので、ここでは 90% 以下の圧下率での議論に限ることとする。90% 以下の圧下率の範囲においては、 r 値は第 1 に圧下率の影響を受けることは従来から指摘されているとおり¹²⁾ であり、圧下率の関数であることは異論の無いところである。すなわち各パスごとのひずみ量 $\ln(t_{i-1}/t_i)$ の総和で表される圧下率にもっとも大きな影響を受ける。その上すでに示したように各パスごとのロール径/板厚にも影響される。これまで述べてきたように、1パス当たりの圧下率および全冷延圧下率が一定であれば初期板厚 t_0 のみで板厚を代表させることができるが、現実には各パスごとに板厚、ロール径、圧下率などが変化しており、そのことも考慮すると板厚として入り側板厚と出側板厚の平均値を採用する方が普遍的である。そこで i 番目の圧延の際の平均板厚 t_{mi} を $t_{mi} = 1/2(t_{i-1} + t_i)$ として表した。したがって各パスごとのロール径と板厚比は D_i/t_{mi} と表される。これに各パスごとの圧下率を乗じたものの総和で両者の寄与が表現できる。すなわち

$$\sum_{i=1}^n (D_i/t_{mi}) \ln(t_{i-1}/t_i)$$

本実験で得られた結果を Fig. 12 に示す。また田中ら⁵⁾ のデータを同様のパラメーターで整理し、その結果と著者らの結果を合わせて Fig. 13 に示した。本実験結果で

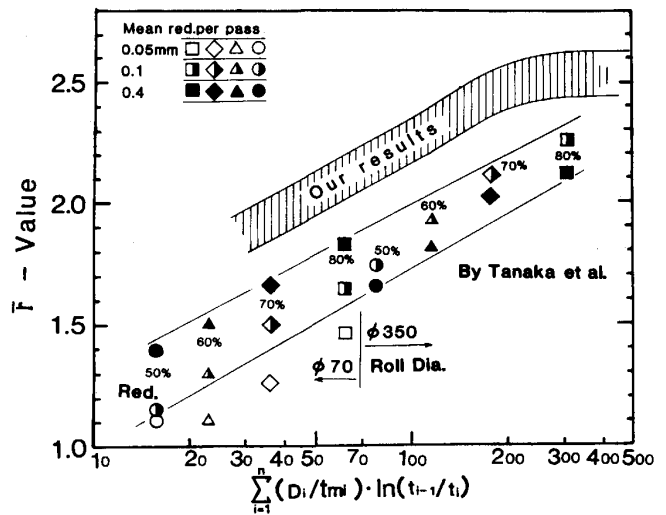


Fig. 13. Comparison with other's data about effect of sum total of {Roll diameter (D_i)/Thickness (t_{mi})} and cold reduction of each pass on r -value.

は、圧下率が 90% を超え、 r 値が低下する領域まで含めて示しているが、そのデータを除くとロール径、板厚、1パス当たりの圧下率、全冷延圧下率すべての変化を含めこのパラメーターでよく整理されている。また田中らのデータには低圧下率でのデータも豊富に示されており、広い範囲にわたってよい相関が得られている。ただし小径ロールで 1パス当たりの圧下量が 0.05 mm のデータのみ著しく低い r 値を示しているが、これはすでに述べたように特殊な条件でのみ生ずるものであり、実用上大きな意味を持たない。また両者の間で r 値の絶対値に差はあるもののこのパラメーターでよく整理できており、ここで導入したパラメーターがより広範囲にわたって適用し得ることがよく表されている。なお本実験結果と田中らのデータの間での r 値の差は素材の化

学組成, 製造方法の違いによるものであり, この議論と関係するものでない。

4. 結 論

極低炭素冷延鋼板の r 値におよぼすロール径および板厚の影響を検討し, 以下の結論を得た。

(1) ロール径の大径化, 初期板厚の薄肉化とともに冷延, 焼鈍後の r 値は向上する。これらの変化はさらにロール径 (D)/初期板厚 (t_0) という無次元化したパラメーターにより一義的に整理することができる。さらに全冷延圧下率, 各パスごとの圧下率や板厚の変化を考慮すると以下に示した各パスごとのロール径/板厚比と圧下率を乗じたものの総和で r 値は整理できる。

$$\sum_{i=1}^n (D_i/t_{mi}) \ln(t_{i-1}/t_i)$$

ただし極端にロール径が小さく, かつ 1 パス当たりの圧下率が低い場合はこの限りでなく, r 値の著しい低下を生ずる。

(2) D/t_0 の減少にともなう r 値の低下は, 第 1 に表面部におけるせん断ひずみ量の増加による深絞り性に好

ましくないせん断集合組織の発達, 第 2 に板中心部における板厚方向の有効ひずみ量の低下による圧延集合組織の発達の抑制にあると考えられる。この D/t_0 の減少にともなうせん断ひずみ量の増加は, 剛塑性有限要素法による解析結果からも明らかになった。

文 献

- 1) 河野 彪, 佐柳志郎, 中島浩衛: 鉄と鋼, **68** (1982), S 382
- 2) 佐柳志郎, 河野 彪, 中島浩衛, 西村秀之, 上赤義信: 鉄と鋼, **68** (1982), S 1421
- 3) 河野 彪, 佐柳志郎: 鉄と鋼, **71** (1985), S 651
- 4) 佐柳志郎, 早川 浩, 河野 彪, 藤田民雄: 鉄と鋼, **71** (1985), S 1354
- 5) 田中康司, 川瀬尚男: 鉄と鋼, **73** (1987), S 520
- 6) 古林英一, 菊池武不児: 鉄と鋼, **63** (1977), S 244
- 7) 松藤和雄, 内田恭彦: 第 65 回日本金属学会講演概要集 (1969), p. 143
- 8) 齊藤好弘, 左海哲夫, 前田 太, 加藤健三: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 799
- 9) 瀬沼武秀, 矢田 浩, 松村義一, 山田健二: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1598
- 10) S. HASHIMOTO, T. YAKUSHIJI, T. KASHIMA and K. HOSOMI: Proc. THERMEC-88 ed. by I. TAMURA (1988), p. 652
- 11) 山田利郎: 金属加工プロセス分科会第 3 研究班第 11 回会合提出資料
- 12) 福田 実: 鉄と鋼, **53** (1967), p. 559