

線材・棒鋼圧延の幅広がり特性とその数式化

篠倉 恒樹*・高井 耕一*

Spread Characteristics and Its Mathematical Models in Rod Rolling

Tsuneki SHINOKURA and Koichi TAKAI

Synopsis:

In order to develop a simple general formula for calculating the spread in rod rolling, the hot rolling of steel by square-oval, round-oval, square-diamond, and diamond-diamond passes has experimentally been studied. The profile of stress-free side surface of rolled rods and the various geometrical factors related with spread ratio have been investigated.

The profile of stress-free side surface differs for the four types of passes; in the square-oval pass, it is assumed to be a straight line; in the round-oval pass, two circular arcs with a radius larger than that of initial rods; in the square-diamond pass, the angle of side surface is similar before and after rolling; in the diamond-diamond pass, its angle after rolling is slightly smaller than before rolling. The calculated and measured values of the maximum projected width of contact are compared and a close agreement is obtained between them.

For all of these four passes, the spread ratio can be expressed by a single formula as follows:

$$\text{Spread ratio} = \frac{B_1 - B_0}{B_0} = \alpha \frac{Ld_m}{B_0 + 0.5 \cdot H_0} \cdot \frac{F_H}{F_0}$$

where B_0, B_1 : Width of material before and after rolling

H_0 : Height of material before rolling

Ld_m : Mean projected arc of contact

F_H/F_0 : Fractional reduction of area before rolling

α : Coefficient (=0.83).

This is a general, simple and sufficient accurate formula.

1. 緒 言

線材棒鋼圧延において生産の合理化、製品の歩留りと品質の向上及びエネルギーの低減をはかるためには電算機による孔型設計、压下条件設定、圧延速度制御などをより積極的に進める必要がある。しかし、これらの技術は孔型圧延特性を正確に記述する数式モデルなしでは達成できず、とりわけ幅広がり式はあらゆる計算の基礎として重要である。孔型圧延の幅広がりとは種々検討され^{1)~10)}、近年では総合的評価をもとにいくつかの数式モデルが提案されている。しかし、計算精度に加えて統一性と簡便性を兼備したものは皆無に近い。本研究では線材棒鋼の代表的圧延方式、角→オーバル、丸→オーバル、角→ダイヤ、ダイヤ→ダイヤについて軟鋼の熱間圧延実験を行い、幅広がり特性の現象的把握とその数式化から、上記条件を備えた実用的な幅広がり式の開発を試みた。

2. 実験方法

圧延実験では直径 200 mm、回転速度一定 (14 rpm) の孔型ロールを備えた二段圧延機を用いた。素材は軟鋼 (SS41) 棒で、角棒と丸棒は市販のみがき棒鋼、ダイヤ棒は厚鋼板を頂角 60 度の菱形材に加工したものである。孔型と素材の幾何学的関係、孔型の名称 (O_1, O_2, D_1, D_2, S)、圧延条件をまとめて Table 1 に示す。オーバルとダイヤの孔型については偏平度の影響を調べるため、いずれも 2 水準を選んだ。

圧延温度は 1050°C 一定とし、窒素ガス中で加熱した素材を無潤滑で圧延した。圧延後の幅広がり側面の形状をノギスで実測し、側面角度 θ を計算[†]で求めた。

$$\dagger \theta = \tan^{-1} \left(\frac{H_s}{B_1 - W_1} \right) \quad \text{ここに } H_s: \text{側面の高さ } B_1: \text{圧延後の材料幅 } W_1: \text{最大投影接触幅の実測値。}$$

Fig. 4(c)(d)参照。

昭和 53 年塑性加工学会講演会にて発表 昭和 56 年 3 月 16 日受付 (Received Mar. 16, 1981)

* (株)富士電機総合研究所 基礎研究所 (Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd, 2-2-1 Nagasaka Yokosuka 240-01)

Table 1. Rolling conditions in four types of passes.

Square - Oval		Round - Oval		Square-Diamond		Diamond - Diamond						
	S-O ₁	S-O ₂		R-O ₁	R-O ₂		S-D ₁	S-D ₂		D-S	D-D ₁	D-D ₂
B ₀	22-25	19-28	B ₀	22-28	22-28	B ₀	27-34	27-34	B ₀	21-28	15-24	14-24
H ₀	22-25	19-28	H ₀	22-28	22-28	H ₀	27-34	27-34	H ₀	34-49	27-45	24-42
G	0-1	0-3.5	G	0-2	0-2	G	0-3	0-2	G	0-4.5	0	0
B _k	34.4	35.3	B _k	34.4	35.3	B _k	36.7	36.7	B _k	27.6	36.7	36.7
R _k	20	24	R _k	20	24	θ	115	130	θ	90	115	130
Red	15-33	16-47	Red	5-27	13-38	Red	5-27	16-45	Red	9-31	3-37	11-44
*	□	■	*	○	●	*	△	▲	*	◇	◆	◆
B ₀ (mm) : Width H ₀ (mm) : Height G (mm) : Roll gap Red(%) : Fractional reduction of area						B _k (mm) : Width R _k (mm) : Radius θ (°) : Apex angle * : Marks in figures						

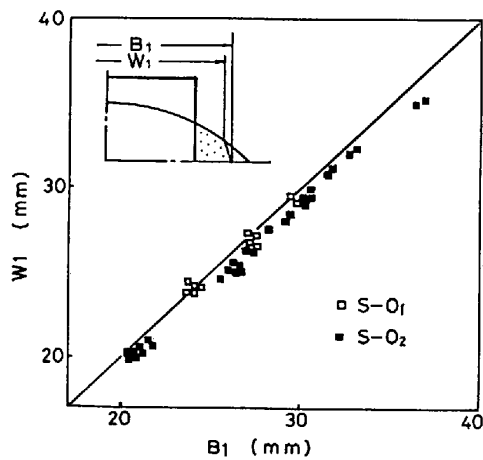


Fig. 1. Comparison between maximum spread (B_1) and maximum projected width of contact (W_1) in square-oval passes.

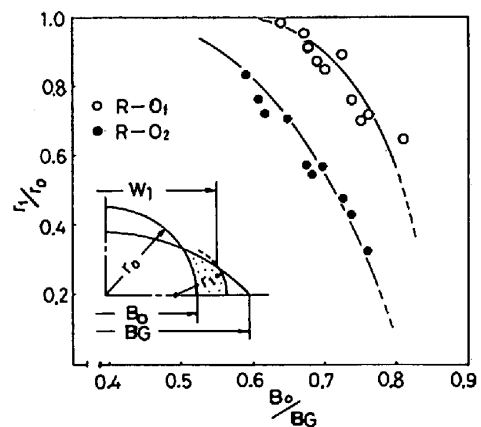


Fig. 2. Relation between radius ratio (r_1/r_0) and width ratio (B_0/B_G) in round-oval passes.

3. 実験結果及び検討

3.1 幅広がり現象

3.1.1 角→オーバル (S→O と略記, 以下同様)

Fig. 1 は圧延後の幅 B_1 と最大投影接触幅 W_1 を比較したものである。一般に材料側面のふくれ出しがあるため、 $B_1 > W_1$ となるが、両者の差は小さいので、側面の形状は実用上直線で近似される。

3.1.2 丸→オーバル (R→O)

この場合の側面形状は素材の半径よりも小さい半径でわん曲する。

Fig. 2 は圧延前後の材料側面の曲率半径の比 r_1/r_0 をサイドリリーフ係数 B_0/B_G で整理したものである。 B_G は Fig. 4 参照。 r_1/r_0 は 1.0 より小さく、 B_0/B_G の増加と共に減少し、また同じ B_0/B_G に対して孔型が扁平なほど、そのレベルは低い。 r_1/r_0 が減少する理由は R→O が S→O と異なり、主に幅中央圧下であるので、側面中央部でのふくれ出しが大きいためである。本圧延の場合、側面形状を r_1 の円弧で近似すると、数式化が容易でないので、後で述べるように W_1 を正確に与えることも考慮した特別の近似法が必要である。

3.1.3 角→ダイヤ (S→D)

これもR→Oと同じく幅中央圧下であるが、圧延後の側面形状はR→Oの場合と異なり、圧延前のそれを平行移動したものにほぼ等しい。

Fig. 3は圧延前後の側面夾角の比 θ_1/θ_0 を B_0/B_G で整理したもので、破線はS→Dの場合を示すが、充填率 B_1/B_G が著しく高くない範囲では $\theta_1 = \theta_0$ とみなして差し支えない。完全充填の付近では材料は孔型になじむので、 θ_1/θ_0 は急減する。

3.1.4 ダイヤ→ダイヤ (D→D)

素材の高さ比 H_0/B_0 が1.0より大きいので、一般に圧延後の側面は原形を保ちにくい。Fig. 3の実線で示すように θ_1/θ_0 は1.0より小さく、かつ B_0/B_G の増加と共に漸減している。減少の度合は孔型の頂角が小さいほど少なく、頂角が90度では近似的に $\theta_1 = \theta_0$ となり、S→Dの場合とほぼ同じ現象を示す。

3.2 側面形状の近似法と数式化

上述のように幅広がり側面の形状は圧延方式によつて基本的に異なる。Fig. 4は各圧延方式の側面形状を幾何学的に近似する方法及び幾何学的記号の説明図である。

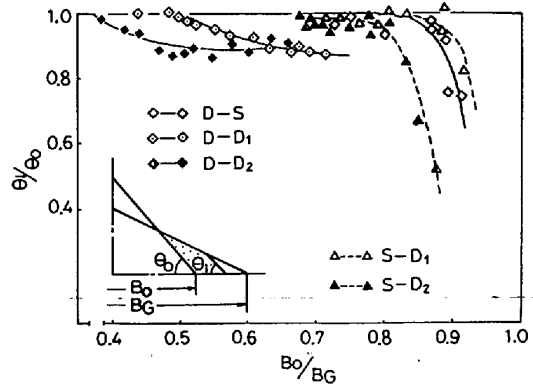


Fig. 3. Relation between angle ratio (θ_1/θ_0) and width ratio (B_0/B_G) in square-diamond and diamond-diamond passes.

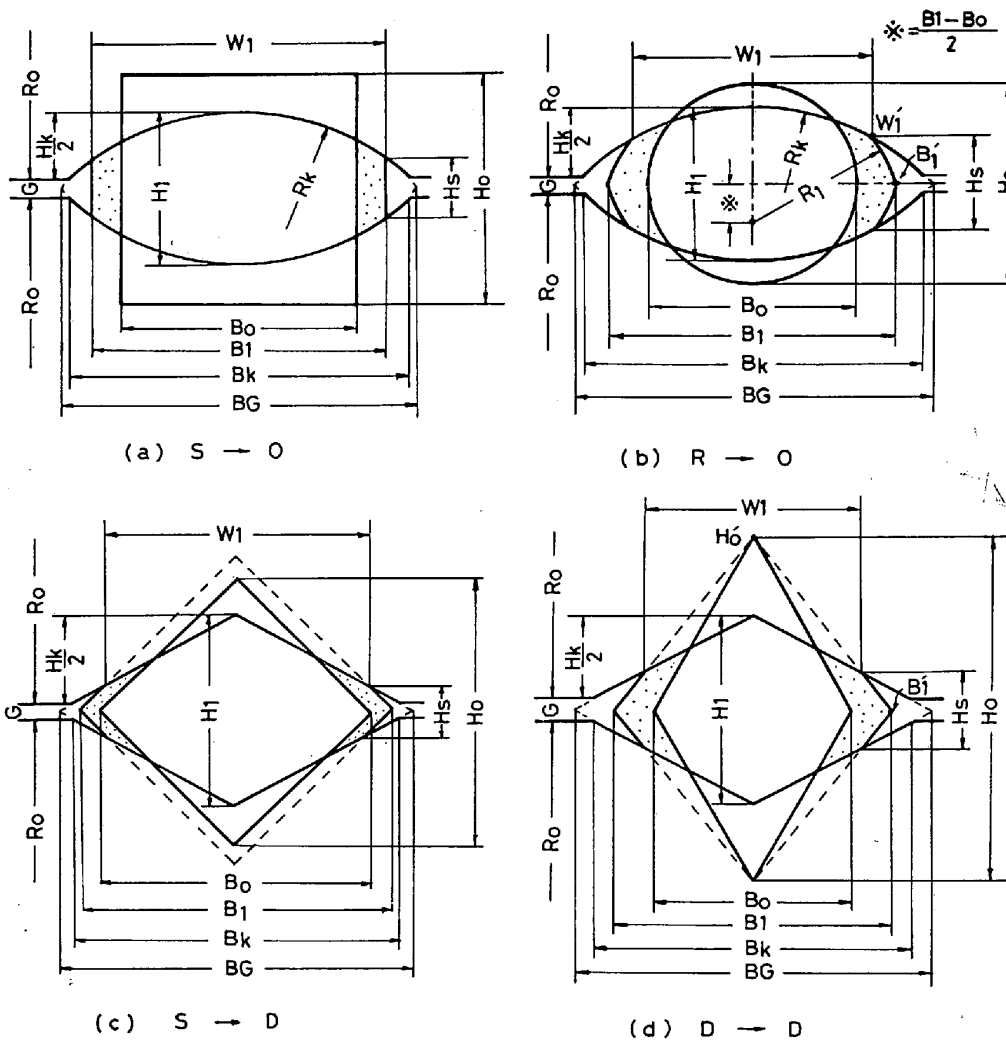


Fig. 4. Geometrical designations and approximations of profiles of side free surfaces for the four types of passes.

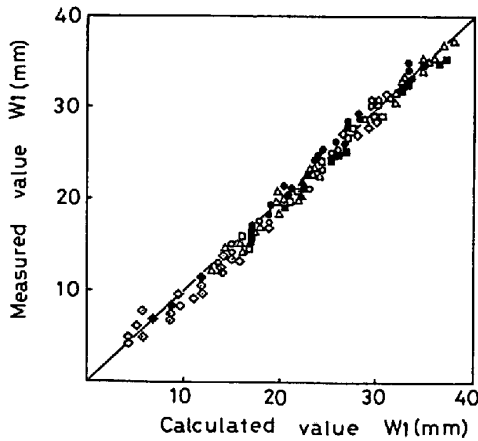


Fig. 5. Comparison between measured and calculated values of maximum projected width of contact (W_1) in square-oval, round-oval, square-diamond passes.

る。いずれの方式でも側面の形状は上述の結果に基づき、直線または円弧で近似されている。

S→Oの場合には直線近似が可能であるから、 $W_1 = B_1$ である。R→Oでは前述のような理由で、特別のくふうを行う。第一象限で示せば次のようになる。つまり圧延前後の幅 B_0 と B_1 が既知^{†2} の場合、素材と孔型の中心から図示のごとく垂直下方に $(B_1 - B_0)/2$ だけ移動した点を中心とし、圧延後最大幅の点 (B_1') を通る半径 R_1 の円弧を描く。S→Dでは素材の形状を平行移動させ、相似形を作る。D→Dでは圧延後の側面夾角 θ_1 は圧延前の夾角 θ_0 より圧下率の大きさに応じて若干小さくなるので、Fig. 4 (d) に示すように圧延後最大幅の点 (B_1') と素材の頂点 (H_0') を結ぶ直線で近似される。

以上の幾何学的近似法に従えば、側面形状は簡単に精度よく数式化される。ここでは近似法の妥当性を確認する意味で W_1 の計算値と実測値を比較した結果を Fig. 5 に示す。両者の間にはおおむね良好な一致がえられている。各圧延方式の W_1 の計算式は次のとおりである。

1) S→O では

$$W_1 = B_1 \dots\dots\dots (1)$$

2) R→O では

$$W_1 = \sqrt{(H_1 - H_S)(4 \cdot R_K + H_S - H_1)} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

$$H_S = \frac{4(R_K \cdot H_1 - R_1^2) - H_1^2 + (B_1 - B_0)^2}{2(2 \cdot R_K - H_1 - B_1 + B_0)} \dots\dots\dots (3)$$

$$H_1 = H_K + G \dots\dots\dots (4)$$

$$R_1 = \sqrt{(B_1^2 - B_1 \cdot B_0 + B_0^2)/2} \dots\dots\dots (5)$$

3) S→D では

^{†2} B_1 は後述の幅広がり式から求められる。

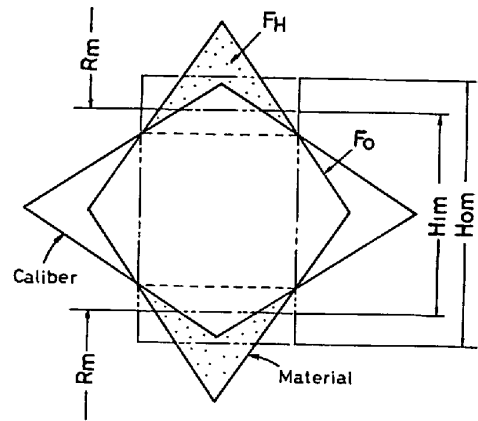


Fig. 6. Equivalent rectangular transformation method to determine mean heights of both material and caliber.

$$W_1 = \frac{B_K(B_1 - H_1)}{B_K - H_K} \dots\dots\dots (6)$$

4) D→D では

$$W_1 = \frac{B_1 \cdot B_K(H_0 - H_1)}{H_0 \cdot B_K - B_1 \cdot H_K} \dots\dots\dots (7)$$

さらに圧延後の材料の断面積 F_1 の実測値と計算値を比較した結果も良好であった。

3.3 幅広がり実験式

幅広がり式については板圧延のそれをもとに検討した。板圧延では信頼性と使用実績の高い式が多い。その中で代表的な SIEBEL の式¹¹⁾は非常に簡単で精度もよく汎用性に富むので、この式を Fig. 6 に示す矩形換算法で孔型圧延に適用し、(8)式をえた。

$$\Delta B = B_1 - B_0 = \alpha' \cdot Ld_m \frac{H_{0m} - H_{1m}}{H_{0m}} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 Ld_m = 平均投影接触長 = $\sqrt{R_m(H_{0m} - H_{1m})}$

H_{0m} = 素材の平均高さ

H_{1m} = 孔型の平均高さ

R_m = 平均ロール半径

α' = 係数

(8)式に実測値を適用してみたが、圧延方式によつて統一的把握はえられにくく、特にD→Dではまったく不ぞろいになることがわかった。これは $\Delta B/B_0$ と $(H_{0m} - H_{1m})/H_{0m}$ の関係 (Fig. 7) 及び $\Delta B/B_0$ と Ld_m/B_0 の関係 (Fig. 8) を比較した場合に、前者よりもむしろ後者が圧延方式によつて著しく分散するからである。これを改善するために種々の合成パラメータを考へて幅広がり率 $\Delta B/B_0$ との関係調べ、最終的に簡便性と汎用性を重視してまとめたのが次式である。

$$\frac{\Delta B}{B_0} = \alpha \cdot \frac{Ld_m}{B_0 + n \cdot H_0} \cdot \frac{F_H}{F_0} = \alpha \cdot Y(n) \dots\dots\dots (9)$$

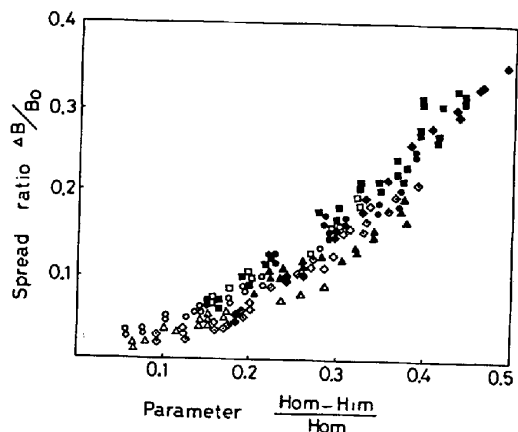


Fig. 7. Relation between spread ratio ($\Delta B/B_0$) and parameter $(H_{om}-H_{1m})/H_{om}$ in square-oval, round-oval, square-diamond and diamond-diamond passes.

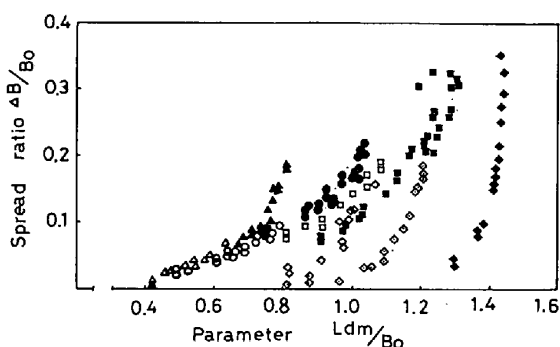


Fig. 8. Relation between spread ratio ($\Delta B/B_0$) and parameter (Ld_m/B_0) in square-oval round-oval, square-diamond and diamond-diamond passes.

ここに、 $Y(n)$ = 合成パラメータ

F_H : 素材の断面が孔型によつて幾何学的に排除される部分の面積 (Fig. 6)

F_0 : 素材の断面積 (Fig. 6)

α : 圧延方式によつて異なる係数

n : 統一化のための定数

(9)式は $n=0$ の場合、(8)式と類似する。 $\Delta B/B_0$ と F_H/F_0 の関係は4圧延方式ともまとまった傾向を示すことが確認されたので、 $\Delta B/B_0$ と $Ld_m/(B_0+nH_0)$ の関係を一本の曲線でまとめることを試みた。試行錯誤で n に種類の値を代入し、両者の関係がよく整理されたのは $n=0.5$ であつた。そこで、これを(9)式に代入し、 $\Delta B/B_0$ と $Y(0.5)$ の関係を示したのが Fig. 9 である。全圧延方式に対し、実用的精度 (B_1/B_0 で $\pm 4\%$) で統一的直線関係がえられている。最終的幅広がり式は(10)式で与えられる。

$$\frac{\Delta B}{B_0} = \alpha \cdot \frac{Ld_m}{B_0 + 0.5 \cdot H_0} \cdot \frac{F_H}{F_0} = \alpha \cdot Y(0.5) \quad \dots\dots\dots (10)$$

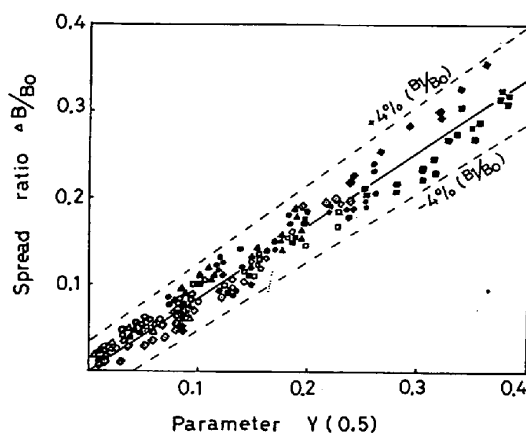


Fig. 9. Relation between spread ratio ($\Delta B/B_0$) and parameter $Y(0.5)$ in square-oval, round-oval, square-diamond and diamond-diamond passes.

一般に α は圧延方式によつて若干異なるが、4圧延方式をまとめて回帰分析したところ、 $\alpha=0.83$ であつた。

4. 新幅広がり式の適用範囲

本実験では圧延方式が4種で、しかも $D \rightarrow D$ では素材の頂角が一定 (60度) であり、またロール径や圧延速度にも制約があつたが、その後の実験で広く適用できることが実証された。つまり今回の逆方式、 $O \rightarrow S$, $D \rightarrow S$, $O \rightarrow R$ や $O \rightarrow O$ 、素材の頂角が60度以外の $D \rightarrow D$ にも、また小径ロールミルにも適用できること、その際 α は、0.8~1.1の範囲にあることが判明した。さらに斎藤ら¹²⁾の広範な実験及び現場圧延データでも成立することが確認された。

5. 結 言

線材棒鋼圧延の代表的圧延方式4種について軟鋼の熱間圧延実験を行い、各方式で幅広がり側面の形状を調べ、その近似法を考察し、新幅広がり式の開発を試みた。

幅広がり側面の形状は圧延方式によつて基本的に異なり、 $S \rightarrow O$ では直線、 $R \rightarrow O$ では円弧、 $S \rightarrow D$ では素材と相似の直角、 $D \rightarrow D$ では素材より小さい角度で近似され、それらの幾何学的近似法が提示された。これらの近似法を用いて最大投影接触幅及び材料出側断面積を算出し、実測値と比較してよい一致がえられた。さらに4圧延方式に共通の簡便な幅広がり実験式が開発された。

おわりに本研究に関して多大な御協力と御教示をいただきました大阪大学助教授斎藤好弘博士と同研究室の皆様、富士電機製造(株)技術部黒宏氏並びに実験遂行に協力された当社研究員勝山昭史氏に深く感謝します。

文 献

- 1) 柳本左門: 塑性と加工, 5(1964) 40, p. 315
- 2) 斎藤好弘, 森賀幹夫, 加藤俊二, 内田正二郎, 加藤健三: 鉄と鋼, 63(1976) 14, p. 1833
- 3) 斎藤好弘, 森賀幹夫, 加藤健三: 鉄と鋼, 63(1977) 12, p. 1819
- 4) 斎藤好弘, 高橋洋一, 加藤健三: 鉄と鋼, 64(1978) 2, p. 250
- 5) M. L. ZAITSEV: Stal in English. Dec. (1968), p. 1037
- 6) M. L. ZAITSEV and G. V. ANUFRIEV: 同上, Aug. (1969), p. 727
- 7) M. VATER and A. SCHÜTZA: Arch. Eisenhüttenw., 42 (1971) 7, p. 459
- 8) A. SCHÜTZA: 同上, 44 (1973) 1, p. 35
- 9) R. R. ARNOLD, P. W. WHITTON: Metals Tech. March, (1975), p. 143
- 10) C. SCHLEGEL and A. HENSEL: Neue Hütte, 21 (1976) 9, p. 513
- 11) E. SIEBEL and E. FANGMEIER: Mitt. K. W. I. Eisenforschung, 12 (1930), p. 225
- 12) 斎藤好弘, 中野 進, 高橋洋一: 昭和 54 年度塑性加工春季講演会講演論文集 (1979), p. 505