
連続鍛圧の生産設備と操業技術

Production Facilities and Operational Technique of Continuous Forging Process

馬田 一(Hajime Bada) 数土 文夫(Fumio Sudo) 松川 敏胤(Toshitane Matukawa)

要旨：

連铸铸片を未凝固で大圧下することにより、中心偏析の生成を防止し、かつ偏析度を制御する連続鍛圧法の実生産への適用を行った。多ストランドに適した高効率の鍛圧設備を開発し、1990年、水島製鉄所第3ブルーム連铸機に世界で初めて工程生産設備を建設した。本設備は、1台の電動モータで4ストランドを順次鍛圧するクランク機構を有し、铸片との同調追従もシンプルである。また、実機における大量生産技術を確立し、所期の優れた製品特性を確認した。1991年より営業生産を開始し、その後、今日まで安定した生産を続けており、品質の向上と新製品の開発に寄与している。

Synopsis：

Continuous forging process to solve the segregation problem in continuous casting was devised and constructed at No.3 continuous casting machine of Mizushima Works in 1990 as the first one of its kind in the world. The process has been successfully applied to the commercial production of high quality CC bloom with no centerline segregation or negative centerline segregation. Special care was taken for designing the process of a multi-strand caster to simplify the facility and decrease the investment cost by adopting a crankshaft system driven by a single motor. Degree of the centerline segregation can be controlled within the range of negative to positive depending upon the requirements of customer for the products by choosing the solid fraction at forging.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Production Facilities and Operational Technique of Continuous Forging Process



馬田 一
Hajime Baba
水島製鉄所 製鋼部製
鋼技術室長(部長補)



数土 文夫
Fumio Sudo
水島製鉄所 企画部長



松川 敏胤
Toshitane Matsukawa
千葉製鉄所 プロセス
開発部開発設計室 主
査(課長)

要旨

連铸鋳片を未凝固で大圧下することにより、中心偏析の生成を防止し、かつ偏析度を制御する連続鍛圧法の実生産への適用を行なった。多ストランドに適した高効率の鍛圧設備を開発し、1990年、水島製鉄所第3ブルーム連铸機に世界で初めて工程生産設備を建設した。本設備は、1台の電動モータで4ストランドを順次鍛圧するクランク機構を有し、鋳片との同調追従もシンプルである。また、実機における大量生産技術を確立し、所期の優れた製品特性を確認した。1991年より営業生産を開始し、その後、今日まで安定した生産を続けており、品質の向上と新製品の開発に寄与している。

Synopsis:

Continuous forging process to solve the segregation problem in continuous casting was devised and constructed at No.3 continuous casting machine of Mizushima Works in 1990 as the first one of its kind in the world. The process has been successfully applied to the commercial production of high quality CC bloom with no centerline segregation or negative centerline segregation. Special care was taken for designing the process of a multi-strand caster to simplify the facility and decrease the investment cost by adopting a crankshaft system driven by a single motor. Degree of the centerline segregation can be controlled within the range of negative to positive depending upon the requirements of customer for the products by choosing the solid fraction at forging.

1 緒 言

連続铸造鋳片の中心偏析を改善することを目的に、従来から電磁攪拌^{1,2)}や軽圧下法^{3,4)}、等軸晶率の増大を目的とした低温铸造法⁵⁾が実操業で適用されているが、セミマクロ偏析の防止などに改善の余地が残されている。

そこで、従来の方法の延長では限界があると考え、新しい中心偏析改善法として、凝固末期の鋳片を金型を用いて連続的に大圧下することにより、濃化溶鋼を排出するとともに凝固界面どうしを強制的に圧着させる、未凝固大圧下法⁶⁻¹⁰⁾を開発した。

1985年に水島製鉄所の第1連铸機に試験設備を設置し、原理確認のための実験を行った。種々の鋼種について調査を行った結果、適正な鍛圧条件を選択することにより、内部割れを発生させることなく、中心偏析を解消し、必要に応じて中心部の偏析度を負偏析に制御可能であることがわかった。

このように画期的な効果が認められたので、実生産への適用を進め、多ストランドに適した高効率の鍛圧設備を開発し、1990年、水島第3連铸機に世界で初めての工程生産設備¹¹⁾を稼動させた。

実機における大量生産技術を確立し、所期のとおり優れた製品特

性を確認し、1991年より営業生産を開始した。その後、今日まで安定した生産を続けており、品質の向上と新製品の開発¹²⁾に寄与している。

本報では、工程生産設備の概要と本設備による操業技術について述べる。

2 実用化の課題

連続鍛圧法を実用化するための要件とそれに対応する課題をFig. 1に示す。本技術は凝固途中で鋳片を大圧下することにより、内部割れを防止しながら中心偏析を制御することである。実用化するには長時間安定して操業可能とする技術、および、本鍛圧による表面傷を圧延後に残さない技術を確認する必要がある。これら技術は互いに関連しているが、基本的には鍛圧の量と方法および鍛圧位置における鋳片の凝固状態の制御が重要であり、この組み合わせにより、所期の目的を達成する必要がある。

本連続鍛圧法を実際の連铸機に適用する際、まず問題となるのは設備的なスペース上の制約であり、特に既存の複数ストランド連铸機に設置するためには、この複数ストランドを同時に鍛圧が可能とする設備設計が必要である。また鍛圧しながら鋳片を引き抜くためには、鋳造方向の鋳片の移動と金型の移動を完全に同調させることも重要である。

* 平成5年11月19日原稿受付

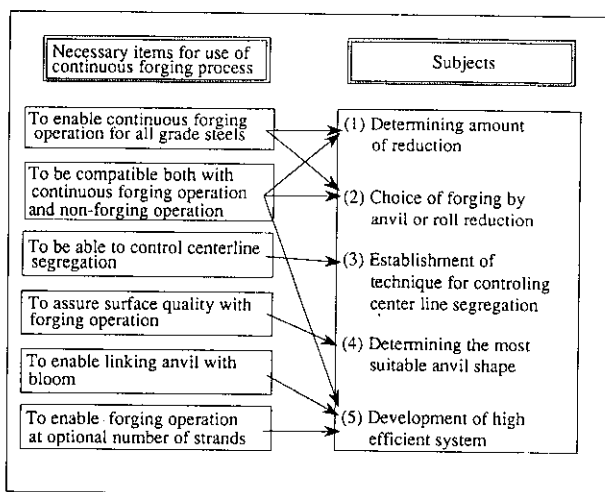


Fig. 1 Main subjects to be solved for practical use of continuous forging process

さらに、操業の開始から定常鍛造中はもとより操業終了時まで、本連続鍛圧法を有効に活用する技術の確立も重要である。

3 連続鍛圧設備の基本的な考え方

3.1 必要鍛圧量の決定

中心偏析を解消するには、凝固完了前の鋳片の固液共存相厚みに応じて適正な鍛圧量を加える必要がある。固液共存相厚みは主としてモールドから鍛圧装置まで鋳片が移動するのに要した時間（以下、これを到達時間と呼ぶ）によって決まる。鍛圧装置の設置位置が決まれば、各鋼種ごとに鍛造速度が決まり、これにより連铸機の生産性も決定される。したがって、鍛圧装置の設置位置は生産性も考慮したうえで、鍛圧の全対象材に対して適正な固液共存相厚みとなるように決定する必要がある。

水島第3連铸機の鍛圧機の場合、既存の連铸機内への設置であったため、設置スペース上の制約と従来の生産性を確保する観点から引抜き矯正装置の後方に設置した。

固液共存相厚みにおよぼす鋳片側の主要因として鋳片サイズと鋼の成分系がある。鋳片サイズの影響に関しては、厚みが大いほど固液共存相厚みが大きくなる。また、成分系の影響は炭素含有量の影響が顕著で Fig. 2 に示すように炭素含有量が多いほど固液共存相厚みは大きくなる。

必要鍛圧量は、固液共存相厚みの範囲が決まれば、その最大値に基づいて設備仕様の最大鍛圧量を決定する。これは、中心偏析を解消するには、上下の固相どうしを完全に圧着するだけの鍛圧量が必要なのである。実際の操業における鍛圧量は、次に示すような条件を考慮して適正な量を選択する。

(1) 製品品質からの条件

製品の要求特性から決まる中心部濃度の偏析度

(2) 圧延工程からの制約条件

圧延での圧下比、最終製品厚み、圧延歩留りなどによる形状の条件

(3) 鋳造、鍛圧工程での条件

表面割れ、内部割れを発生させない条件および圧下力制約

一例として、水島第3連铸機における実施例を示す。鍛圧位置における固液共存相厚みは Fig. 2 に示すようになり、内部割れ防止

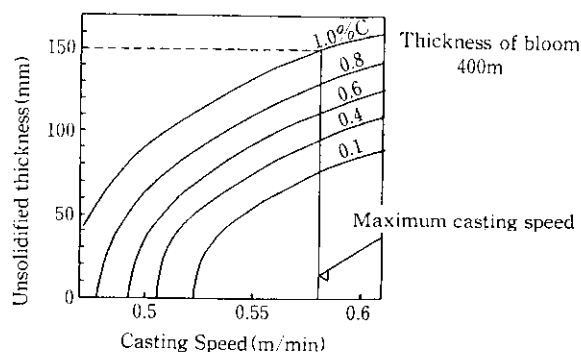


Fig. 2 Relationship between casting speed and unsolidified thickness

の観点から最大鋳造速度は 0.58 m/min であり、この時の 1.0% 炭素鋼の固液共存相厚みから設備の最大圧下量を 150 mm と決めた。

3.2 圧下方法の検討

150 mm といった大圧下の場合、ロール圧下法では設備の構成が非現実的である。連続鍛圧法は品質、設備の両面でロール圧下法より優れているので、圧下方法として、連続鍛圧法を採用した。

連続鋳造中の鋳片を金型を用いて鍛圧すると、その抵抗により鋳造速度が変動し、操業および品質に支障をおよぼす恐れがある。鋳造速度は連続鋳造機のピンチロールにより制御されており、鍛圧中の金型には、鋳片と精度よく同調して移動させる機構と制御が必要である。

連続鍛圧法の圧下機構を Fig. 3 に示す。圧下機構はクランク構造であり、圧下力と圧下トルクを分離でき、金型はクランク軸で自由に回転し鋳造方向にフリーとなっている。鍛圧中の金型は、鋳片の引抜き力をほとんど変化させることなく、鋳片と同調して移動することができる。このため、ピンチロールとの同調制御装置が不要である。

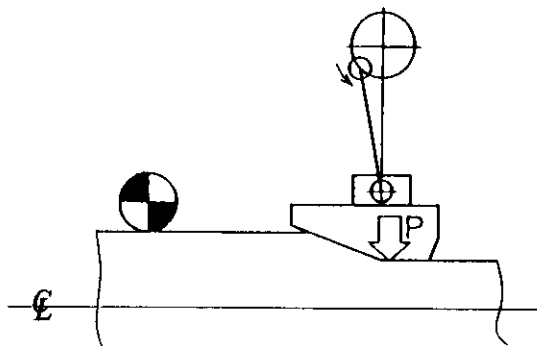


Fig. 3 Method of forging by anvil

3.3 鍛圧金型形状の最適化

連続鍛圧における金型形状は鍛圧時の鋳片に割れが発生しないように決める必要がある。鋳造方向の金型断面形状を Fig. 4 に示すが、傾斜角 θ (degree)、テーパ部長さ l_1 (m)、平坦部長さ l_2 (m) の三つで構成される。それぞれの値の決定法を以下に述べる。

傾斜角 θ は次の三つの観点から最適値が決められる。

(1) 金型と鋳片がすべらない

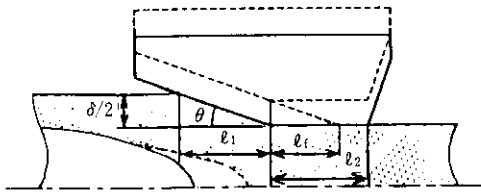


Fig. 4 Cross section of anvil and bloom along casting direction at the start point of forging

$\theta \leq$ 摩擦角 ($\tan^{-1}\mu$) を満たす。 μ は金型と鋳片間の摩擦係数で、熱間鍛造では一般に 0.35 程度であり、その角度は $\theta \leq \tan^{-1}0.35 = 20^\circ$ となる。

(2) 内部割れ防止

鍛圧中に鋳片内に発生する応力がその温度での許容値以下とする。発生応力は、2次元剛塑性有限要素法で解析し、凝固界面が圧縮応力状態になっていることを確認している。

(3) 濃化溶銅の排出性

θ は大きい程よい。

以上より、金型角度は前記(1)と(2)が許す範囲で大きくとることにした。

テーバー部長さ ℓ_1 は、鍛圧量 δ (mm) と傾斜角 θ から幾何学的に決まり、次式で示される。

$$\ell_1 > \delta / (2 \cdot \tan \theta) \quad \dots\dots\dots (1)$$

平坦部長さ ℓ_2 は、鍛圧後の鋳片鍛圧面の段差をなくす条件から、金型の1回の鋳造方向の送り量 ℓ_i (mm) より大きくする。

$$\ell_2 > \ell_i, \quad \ell_i = V_c \cdot t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 V_c は鋳造速度 (m/min)、 t は鍛圧の圧下周期 (min) である。

4 高効率量産設備の開発

4.1 第3連铸機連続鍛圧設備の概要

本連铸機は、湾曲型のブルーム、ビームブランク兼用機で、その主仕様を Table 1 に示す。鍛圧設備の設置位置は、適正な固液共存相厚みを確保し、かつ従来生産性を維持する条件から、Fig. 5 に示すように、既設連铸機のダミーバーテーブルを後方に移設し、ピ

Table 1 Main specifications of Mizushima No.3 CC

Machine type		Curved type
Size	Bloom (mm)	400×560 300×400
	Beam blank (mm)	400×460×120
No. of strands		4
Curved radius (m)		12.5 22.0
EMS		strand+final (two points)

Table 2 Main specifications of continuous forging facilities

Method of reduction	Electric motor driven crank
Pressure of reduction	max. 1200 t
Amount of reduction	max. 150 mm
Forging location (distance from meniscus)	26 m
Motor	AC 900 kW

ンチロールとダミーバーテーブルの間とした。モールド湯面からの距離は 26 m の位置にある。鍛圧装置の主仕様は、鋳片のサイズと鋳造鋼種を基準に、前述した考え方を適用し、Table 2 のように決定した。

4.2 圧下機構

鍛圧の駆動方式は、電動式と油圧式が考えられるが、鍛圧時の運転電力コスト、騒音の低さ、メンテナンス性などの面で電動式が油圧式より優れているので電動式を採用した。

鍛圧機構に関しては、Fig. 6 に示す電動クランク機構を新たに開発した。これは、電動モータにより駆動されるクランク軸のクランク運動により鍛圧するもので、ストランドごとに鍛圧時期の位相を変えることにより、4 ストランドの鍛圧を1台の電動モータ行うこ

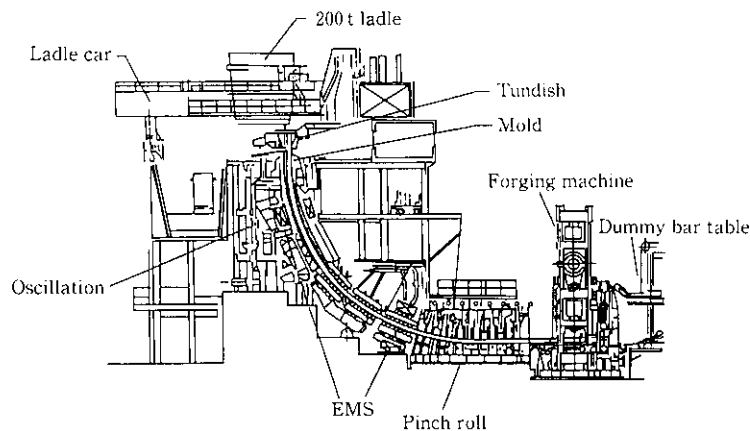


Fig. 5 Schematic diagram of No.3 CCM at Mizushima Works

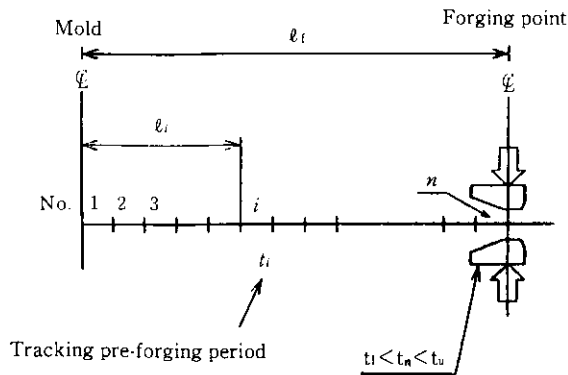


Fig. 9 Tracking method of controlling pre-forging period

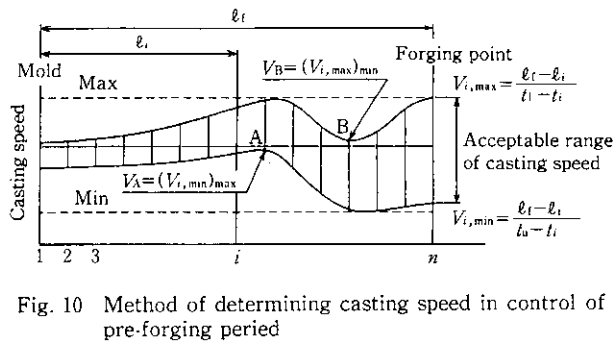


Fig. 10 Method of determining casting speed in control of pre-forging period

示すように鍛圧位置での許容の到達時間となるように各ブロックごとに許容の鋳造速度範囲 $(V_i)_{\min}$, $(V_i)_{\max}$ を求める。

$$(V_i)_{\max} = (l_t - l_i) / (t_i - t_i) \quad (3)$$

$$(V_i)_{\min} = (l_t - l_i) / (t_u - t_i) \quad (4)$$

$$(V_i)_{\min} \leq V_i \leq (V_i)_{\max} \quad (5)$$

ここに、 V_i (m/min) はブロック i における許容鋳造速度、 l_t , l_i それぞれモールドから鍛压机、モールドからブロック i までの距離である。 t_u t_i 目標偏析度に対する、最大許容到達時間および最少許容到達時間を示し、 t_i はモールドからブロック i までの到達時間である。

- (3) Fig.10 より全ブロックにわたって許容範囲内となる鋳造速度 (V) を選定し、その時点での鋳造速度とする。なお、鋳造速度変化が大きい場合、全領域で許容範囲を満たす速度が設定できない場合もあるが、その場合、品質不良部の長さを最少にする条件より鋳造速度を設定する。

$$(V_{i,\min})_{\max} \leq V \leq (V_{i,\max})_{\min} \quad (6)$$

ここで、 V はトラッキング時点における設定鋳造速度。

- (4) 以上の操作を鋳造中、連続的にトラッキングして最適な鋳造速度を時々刻々と設定し、目標の到達時間になるよう制御する。
- (5) なお、(3)での許容速度設定において、実際には、前半のブロックで許容速度範囲から外れても後半のブロックでは調整できる場合が多いので、最初から制御範囲を後半のブロックに限定して制御することも可能である。こうすることにより鋳造速度の許容範囲が増え、制御の応答性が向上するので、実操業では有効となる場合が多い。

以上の鋳造速度制御方法により、鋳片中心部の偏析度を常に安定して一定の目標値に制御する技術を確認した。

5.2 設備能力を軽減する鍛圧スタート技術

鍛圧開始時の鍛圧力は定常鍛圧時に比べて大きい。これは Fig. 11 に示すように、定常鍛圧時の鍛圧力は鋳片 1 回当りの送り量に対応する面積相当分でのいのにに対し、鍛圧開始時は金型の鍛圧部の全面積に相当する分の鍛圧力が必要なためである。そこで、鍛圧開始時の圧下面積を減らすため、Fig. 12 に示すように鍛圧量を数回に分割するように考慮した。この分割圧下スタート法により、1 回当りの圧下面積が減り、鍛圧力は 10~25% 程度軽減でき、設備能力を下げる事ができた。

また、多ストランドに適用時、各ストランドの鍛圧開始時期がクランク運動の同一サイクルに重なり、単一ストランドでのスタート部に比べて大きな駆動動力が必要となる。そこで、ストランド間で鋳造開始時期をずらし、鍛圧開始時期は各ストランド間で少なくとも 1 サイクル以上ずらすようにした。

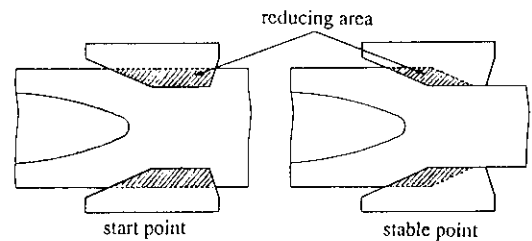


Fig. 11 Comparison of reducing area at start point with that at steady state period during the forging

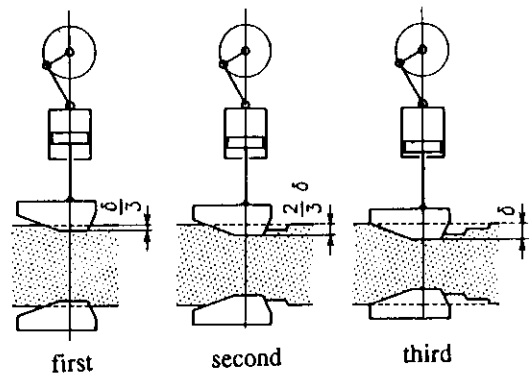


Fig. 12 Step-wise reduction method at the start point of forging

5.3 鋳造終了部の操業安定技術

鋳造終了部近傍では、鋳片末端部が凝固した状態で鍛圧するため密封鍛圧となり、内圧が過大となるため鍛圧時の固液共存相の両端部の鋳片に内部割れが発生する場合がある。割れの防止対策は、異常な内圧を発生させないことが重要であり、そのため鋳片末端部の凝固を極力遅延させるようにした。

また、末端部付近に残存する未凝固部分の溶鋼は、凝固の進行により体積収縮する反面、鍛圧により残溶鋼は押し上げられる。この鍛圧による残溶鋼の吐き出し量が凝固収縮量より大きい場合、残溶鋼が鋳片末端部より溢れ出る可能性がある。溶鋼の溢れ出しは操業に重大な影響を与えるが、その有無は鍛圧条件と鋼種によって決ま

る。水島第3連铸機での鍛圧実績では、高炭素鋼ほど溢れ出し量が大きくなり、炭素量0.7%以上の鋼種については、铸造終了時に溢れ出し防止の方策を講じ、安定操業が可能となった。

6 結 言

連铸铸片の中心偏析の改善を目的として、従来になかった新しい方法として、金型による連続鍛圧法を開発し、試験設備で効果を確認した。実生産への適用を進め、多ストランドに適した高効率の鍛圧設備とその操業技術を開発した。

得られた結果は以下のとおりである。

(1) 必要鍛圧量は、鍛圧実施位置における、固液共存相の厚みに

依存し、铸片の厚み、铸造速度、鋼の化学成分（特に炭素）により決定される。設備としての最大鍛圧量は、適用する連铸機での铸造条件における最大の固液共存相厚みに相当する。

(2) 压下機構として、クランク構造とすることにより、圧下力と圧下トルクを分離でき、鍛圧中の金型は铸片と同調して円滑に移動することが可能になった。

(3) 多ストランドの連铸機への適用をシンプルな設備で実現するために、クランク軸1回転で鍛圧時期の位相をずらし、各ストランドを順次鍛圧する設備を開発した。

(4) 铸造時の铸造速度変動に対応して、鍛圧位置での到達時間を一定に保つための铸造速度制御法を開発し、中心の偏析度を一定に維持できるようになった。

参 考 文 献

- 1) 山崎久生, 新庄 豊, 木下勝雄, 中西恭二: 鉄と鋼, 71(1985)5, S 208
- 2) 綾田研三, 成田貴一, 森 隆資, 大西稔泰: 鉄と鋼, 67(1981)8, 1278
- 3) 荻林成章, 内村光雄, 磯部浩一, 前出弘文: 材料とプロセス, 2(1989)4, 1162
- 4) 小林日登志, 栗山伸二, 政岡俊雄, 鈴木幹雄, 宮原忍: 材料とプロセス, 2(1989)4, 1158
- 5) 水藤政人, 川縁正信, 蓮沼純一, 新庄豊: 鉄と鋼, 71(1985)4, S 210
- 6) 小島信司, 松川敏胤, 溝田久和, 山崎久生: 鉄と鋼, 73(1987)4, S 209
- 7) 櫛田宏一, 藤村俊生, 今井卓雄: 鉄と鋼, 73(1987)4, S 210
- 8) 藤村俊生, 櫛田宏一, 反町健一: 鉄と鋼, 73(1987)4, S 211
- 9) 藤村俊生, 櫛田宏一, 溝田久和: 材料とプロセス, 2(1989)4, 1166
- 10) 小島信司, 今井卓雄, 藤村俊生, 溝田久和, 松川敏胤: 鉄と鋼, 78(1992)12, 1794
- 11) 小島信司, 溝田久和, 松川敏胤, 数土文夫, 藤村俊生, 吉元義夫: 材料とプロセス, 4(1991)4, 293
- 12) 柳島章也, 山本義治, 川縁正信, 藤田利夫, 中野昭三郎, 浅川貞夫: 川崎製鉄技報, 23(1991)2, 91
- 13) 櫛田宏一, 藤村俊生, 馬田 一, 松川敏胤, 秋本圭一, 浜西信之: 材料とプロセス, 4(1991)4, 294