溶湯の直接圧延機の試作とその予備実験*

梶山正孝** 福迫達一** 佐藤 彰***

Masataka Sugiyama, Tatsuichi Fukusako and Akira Sato : Trial Manufacture of the Machine for the Direct-Rolling of Molten Metals and the Preliminary Experiment. Regarding the process of direct-rolling of molten metals for the continuous production of finished products directly from molten metals as an extended process of the continuous casting method, manufacturing conditions of half-made products by this process have been studied. For this purpose, we manufactured a trial machine for our laboratory, based on that designed by Sir Henry Bessemer. In this paper the details of the direct-rolling apparatus and results of the preliminary experiment using commercial pure Al are reported. The results of investigations on the possibility of the direct-rolling and properties of direct-rolled plates are as follows: (1) It is quite possible to produce half-made products by the direct-rolling apparatus equipped with twin-rolls as in Bessemer's. (2) In case of direct-rolling of molten metals by the apparatus, there is an optimum size for the exit of the feeder of molten metals. When the space between the main rolls for chilling, solidifying and rolling is 15 mm, it is desirable that the optimum size for the exit of the feeder be 100 mm $\times$ 32~35 mm. (3) The direct-rolling apparatus can be used for direct-rolling in cases that the peripheral speed of pinch-rolls is as same as that of the main rolls, or somewhat faster. (4) The direct-rolling apparatus can roll metals immediately after being solidified at a lower direct-rolling speed.

(Received December 29, 1967)

I. 緒 言

一般に薄板、棒、管などの製品を得るには、溶解、铸造して得た铸塊を均熱、分塊加工、加熱、加工するという工程を経ているのであるが、連続铸造法は、均熱、分塊加工の工程を省略しようという考えに基づいて発展して来ている。この連続铸造法の利点は、他にも材料の歩留り、偏析の抑制、均質組織の铸塊が得られるなどがあつて、現在相当広く使用されており、将来ますます使用されることが期待される。

他方、溶湯の直接圧延法は、歴史的には連続铸造法より昔に考えられ、造塊、均熱、分塊加工、加熱工程を省略し、一気に熔融金属から、薄板、棒、管などを連続して製造しようというものである。しかし当時は計測、制御技術が十分に発達しておらず、可能性が試験されただけであり、十分に検討されていない。

この直接圧延法は、熔融金属から固体金属の製造と考えれば、金属铸造であり、他方凝固直後の固体金属の圧延と考えれば温度分布がきわめて複雑な材料の圧延ともいえる。またこの方法は、非可塑性金属材料の薄板、棒、管などの製造にとくに有利であるといわれているが、非可塑性金属材料の直接圧延は、非常な困難が伴うものと考えられたので、まずこの方法を連続铸造法の発展したものと考え、直接圧延法を用いて、中間成品を製造したいのである。

本研究は、前述の研究目的のために試作した直接圧延機

の詳細と、純 Al 溶湯を用いて、直接圧延の可能性について予備実験した結果について述べる。

II. 直接圧延機の試作

まず直接圧延機の発展過程とその具備条件について検討した。

1846 年英国の Bessemer は熔融金属から直接鋳箔や鉛板を生産する特許を得ており⁽¹⁾、1856 年には、malleable iron の厚さ 1 mm、長さ 1 m の薄板製造に成功した。なおこの薄板表面は、きれいであつたと報告している⁽²⁾⁽³⁾。この後、各種の直接薄板製造法の考察特許が、たとえば、Goodale⁽⁴⁾、Lyman⁽⁵⁾、Daniels⁽⁶⁾ などによつて得られている。

1931~1933 年に、Wiland-Werke AG の Junghans⁽⁷⁾ が現在のいわゆる連続铸造法と呼ばれている、底無鋳型による、銅、亜鉛の連続铸造に成功して以降、この方法による各種の金属材料の連続铸造の工業化の成功については、多数の報告がある^{(8)~(14)}。この連続铸造の成功によつて、溶

(1) H. Bessemer : Brit. P., Nos. 11, 317 (1946) and 221 (1957) .

(2) H. Bessemer : J. Iron Steel Inst., **40** (1891) , 23.

(3) H. Herrmann : *Handbuch des Stranggiessens*, (1958).

(4) J. Goodale : USP, 155609, (1874) .

(5) N. R. Lyman : USP, 315045.

(6) F. H. Daniels : USP, 362688.

(7) S. Junghans : *Schwarzmaier Stranggiessens*, (1957) .

(8) W. Roth : Brit. P. 492216.

(9) F. Poland : USP, 2131070.

(10) W. T. Ennor : USP, 831184.

(11) S. Junghans : USP, 2135183.

(12) A. H. Pershon : USP, 831184.

(13) I. Rossi : USP, 2742494.

(14) 中島 : 金属学会会報, **1** (1962) , 381.

** 東京大学工学部冶金学科 (Department of Metallurgy, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

*** 東京大学大学院 (Graduate Student, University of Tokyo, Tokyo)

* 1966 年 10 月本会尼崎大会に発表; 溶湯の直接圧延に関する研究 (第 1 報)

融金属から直接薄板、棒、管などを連続製造する機運が高まり、Properzi⁽¹⁵⁾が溝付ホイールとスチールベルトを組合せて棒材の連続製造に成功した。これ以降、溝付ホイールとスチールベルトの組合せ^{(16)~(19)}、スチールベルトとスチールベルトの組合せ^{(20)~(21)}、水冷鋳型を鎖状に結合したもの⁽²²⁾などによる薄板の連続製造が成功している。

1951年、Hunter⁽²³⁾は、Bessemerの直接圧延機と同じ、2個の水冷ロールの間隙に、下から上方向に、溶融金属を供給する方法によつて、Alの広幅薄板の連続製造に成功している。この方法によつて、薄板の表面状態がきわめて改善され、現在最も有力なAl薄板の連続製造法と考えられている。なおソ連^{(3)~(24)}および日本⁽²⁵⁾においては、Bessemerの装置と同様な2個の水冷ロールを用いて、鋳鉄薄板を連続製造した結果が報告されている。

以上のような各種の連続製造機および直接圧延機を参考にして、つぎのように問題点をまとめた。(1) スチールベルトを使用する方法では、高融点の金属材料の直接圧延には、スチールベルトの、とくに寿命などに問題があると考えられる。(2) 鋳型空隙部の彎曲しているものは、あとで整直しなければならないから、板幅が制限され、材料によつては、亀裂が発生しやすくなる。(3) 水冷鋳型の鎖状結合は、機構的に煩雑すぎる。(4) 底無鋳型による連続製造の結果から、1次冷却、すなわち鋳型の長さはあまり長くする必要がない。(5) 機構的には、2個の水冷ロールを使用する方法が最も簡単である。(6) 直接圧延の際の凝固圧延機構を解析するには、2個の水冷ロールを使用する方法で十分可能である。(7) 直接圧延の際の凝固圧延機構を解析するには、形状は板状で十分可能である。(8) 板厚はあまり薄くない方が直接圧延は容易である。(9) 直接圧延における注湯法は、流れの管理および供給が最も簡単のため、上方から落とし込み、下方に流す方向がよい。

このような問題点の整理から、Bessemerの装置を基本にして、実験室的直接圧延機を作製した。

Fig.1は試作した直接圧延機と付属装置の概要を示す。駆動部は5IPのモーターおよび無段変速機からなり、回転速度が1/20~20 rpm(直径200mmの冷却凝固圧延ロールの場合には、直接圧延速度が、31.4~12560 mm/min)になるようにした。安全装置としては、直接圧延機の主ロール(冷却凝固圧延ロールを以後この名で呼ぶことにする)に取付けたスプロケットに、安全ピン(丸棒)を取付け、過度

の荷重では、これが切断されるようにした。

保持炉には、カンタル線電気抵抗炉を使用し、40番黒鉛

Fig.1 Schematic diagram of the direct-rolling apparatus. A : Holding furnace, B : Molten metal, C : Tundish, D : Stopper, E : Nozzle, F : Feeder of molten metals, G : Housing of main rolls, H : Main rolls, I : Pipes for the water spray for the cooling of main rolls, J : Boxes for the secondary water spray cooling and for the guide of the direct-rolled plate, K : Housing of pinch rolls, L : Pinch rolls, M : Direct-rolled plate, N : Starting plate.

Fig.2 Tundish.

ルツボで金属を溶解し、保持する。

タンデッシュは、**Fig.2**に示すように鋼板にイソライトレンガを内張して断熱し、カオリン粘土水溶液を塗布した。タンデッシュは使用前にガスバーナーで十分に予熱し、溶融金属の温度低下を防止した。また内張したイソライトレンガに穴をあけてノズルとし、黒鉛のストッパー棒と組合せて、溶融金属の流量を調節するようにした。すなわちタンデッシュにおける溶融金属のレベルをほぼ一定と

(15) I. Properzi : Brit. P., Nos. 660692.

(16) J. B. Russell and F. R. Nichols : J. Inst. Metals, **87** (1858~59), 209.

(17) D. M. Lewis : Met. Rev., **6** (1961), 143.

(18) J. N. Porterfield : USP, 2928148.

(19) R. D. Hamer : J. Inst. Metals, **87** (1858~59), 219.

(20) C. W. Hazelett : Brit. P., 688575.

(21) J. Metals, **17** (1965), 1195.

(22) J. L. Hunter : Brit. P., 686085.

(23) J. L. Hunter : Brit. P., 806576.

(24) E. T. Nikolaenko : Proizvodstvo litoi posudui, (1957).

(25) 塩沢、草川、松浦：塑性と加工，**1** (1960)，99.

し、ノズルの穴径を計算流量より少し大きくしておき、ストッパー棒で熔融金属の流量を調節する。

熔融金属を主ロールの間隙に供給し、かつ熔融金属を分配する熔融金属フィーダーは、Fig.3 に示すように、鋼板

Fig.3 Feeder of molten metals.

を溶接したものに 6 mm のアスベスト板を内張り、カオリン粘土水溶液を塗布し、使用前に十分に乾燥させて使用する。この熔融金属フィーダーによつて、熔融金属が主ロールと接触する場所を限定し、熔融金属のレベルの高さの変動が、熔融金属の凝固速度におよぼす影響を緩和することができる。また熔融金属フィーダーの内部の熔融金属のタンデッシュから落下する位置には、イソライトの小片を取付けて、熔融金属の落下の勢いを緩慢にし、熔融金属が板幅方向に一樣に拡がるようにした。

主ロールのハウジングは、直接圧延板の寸法が、幅、厚さともに相当広い範囲変えられるようにし、また主ロールの直径は、最大 400 mm まで変化できるように大きくした。さらに直接圧延方向は垂直に上方から下方に、そして 180° 回転して下方から上方に変化でき、その途中でも傾斜して製造できるよう設計した。

冷却凝固圧延ロール、すなわち主ロールは、Fig.4 に示すように、外径 200 mm、肉厚 15 mm の軟鋼管を溶接して作製し、そのうち 1 個の主ロールは直径 300 mm のフランジがあつて、直接圧延板の幅を決定するとともに、主ロール間隙の横方向に熔融金属が流出するのを防止する。この主ロールによつて、幅 100 mm、厚さ 0~50 mm の板を直接圧延できる。なお主ロールの冷却は、軸に通した外径 20 mm のパイプから水道水を噴出してロール内面を水冷するようにした。

一般の連続鋳造法では、2 次冷却の重要性が非常に強調されているので、主ロールとピンチロールとの間に、2 次冷却スプレー用の箱を取付けた。この箱はまた主ロールを通過した後の板が彎曲するのを防止するガイドの役割もかねている。

冷却凝固圧延を行なう主ロールによつて直接圧延速度が決定されるが、主ロールを通過した板を受ける装置として

Fig.4 Schematic diagram of main rolls; chill, solidify, and roll molten metals.

は、直径 65 mm のピンチロールを使用し、この引出し速度は、主ロールの周速度とある関係で適当に変化できるようにした。このピンチロールの間隙は、製造される板の板厚が、相当変化しても引出しが行なえるように、バネでピンチロールを板に押し付けているようにした。ピンチロールの表面は、直接圧延板の表面に傷をつけないように平滑で、特別に摩擦が大きくなるようにはしていない。

スターティングプレートは、製造される板厚より、少し厚い板にあらかじめボルトを捻込んでおき、このボルトを熔融金属が銕ぐるむことによつて、ピンチロールで引出しが行なえるようにした。

III. 実 験

前述の直接圧延機を用いて、厚さ 15 mm、幅 100 mm の市販の純 Al 板を直接圧延する。実験としては、(1) 直接圧延板の厚さが 15 mm の場合について、熔融金属フィーダーの出口の適正な大きさを決定すること。(2) 主ロール周速度に対する適正なピンチロール周速度を決定すること。(3) 直接圧延板の表面状態、マクロ組織、表面硬度、

Fig.5 Water-cooled book mould.

引張り強さなどを調べて、この直接圧延機による直接圧延の可能性を検討した。

なお、これらの実験結果と比較するため、Fig.5 に示すような従来の水冷鋳型を用いて試料を鋳造し、直接圧延速度が無限大の場合と考え参考に供した。

IV. 実験結果および考察

1. 溶融金属フィーダーの出口の大きさ

板が連続して製造できるためには、種々の条件があるが、溶融金属が冷却凝固圧延の主ロールに接触して、どの位冷却されて凝固するかということがまず問題となる。このことは主として、溶融金属の鋳込温度、直接圧延速度、そして溶融金属フィーダーの出口の大きさなどによつて決定される。そこで本試験機を用いてこれらの関係について調べたところ、溶融金属の鋳込温度が 700°C の場合、板厚 15 mm を直接圧延するには、溶融金属フィーダーの出口の大きさは、 $100 \times 32 \sim 35\text{ mm}$ 位必要なことがわかった。したがって、以後の実験では、溶融金属フィーダーの出口の大きさは、約 $100 \times 33\text{ mm}$ と一定にした。

いま、溶融金属フィーダーの出口の大きさを $100 \times 33\text{ mm}$ とすると、溶融金属が主ロールに接触する距離(鋳型の長さに対応)は、約 4.3 mm が得られ、直接圧延速度が 1.0

なお溶融金属フィーダーの出口の大きさが $100 \times 32 \sim 35\text{ mm}$ 位の場合に最も直接圧延に成功するということは、冷却凝固条件が適正であることと、圧延における噛込み条件が適正であることを意味するものと考えられる⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾。

2. 主ロール周速度とピンチロール周速度との関係

鋳込温度 700°C 、主ロール周速度が 628 mm/min (1.0 rpm) の場合について適正なピンチロール周速度を調べた結果、ピンチロール周速度が主ロール周速度より、 15.7 mm/min 遅い場合には、板が彎曲して、2次冷却ボックスに引掛り、これとは逆に 31.4 mm/min 速い場合には、板が主ロールを通過直後に切断して満足な板が得られなかった。またピンチロール周速度が主ロール周速度より、 15.7 mm/min 速い場合、直接圧延は成功するが、板表面に微細な横割れが多少認められるので、ピンチロール周速度は、主ロール周速度と同速度であるか、多少速いことが望ましいことがわかった。

3. 直接圧延板の性状

Photo.1 に示すように、高鋳込温度、高直接圧延速度の場合には、板の表面に膨れや針状の凸起が発生し、これとは逆に低鋳込温度、低直接圧延速度の場合には、表面状態が良好である。

Photo.1 Surface conditions of direct-rolled plates. A, B: Higher pouring temperature (700°C) and higher direct-rolling speed (1.0 rpm). C: Lower pouring temperature (660°C) and lower direct-rolling speed (1.0 rpm).

rpm (628 mm/min) の場合、その接触時間は、約 4.1 秒となる。

Photo.2 Macrostructure of the direct-rolled plate; (700°C , 0.8 rpm). Stopped direct-rolling.

Photo.2 に、直接圧延を途中で中止した試料のマクロ組織を示す。主ロールの最小間隙に近づくにしたがつて、結晶粒は細かく歪んでいることが認められ、板は多少圧延されているものと思わ

(26) 関口：金属の塑性加工と変質，(1963)。

(27) A. Geleji, 五弓勇雄訳：金属塑性加工の計算，(1965)。

れる。

Fig.6 は、直接圧延速度が直接圧延板の引張り強さ、伸

V. 総 括

直接圧延機を試作し、純 Al を用いてその予備実験を行ない、直接圧延板の性状と直接圧延の可能性を検討してつぎの結果を得た。

(1) Bessemer の twin-roll 方式の直接圧延機を用いて、中間成品を製造することは十分に可能であつた。

(2) Bessemer の twin-roll 方式の直接圧延機を使用して、直接圧延を行なう場合、溶融金属フィーダーの出口の大きさには、最適範囲があると考えられる。冷却凝固圧延の主ロールの間隙が 15 mm の場合は、 $100 \times 32 \sim 35$ mm が望ましい。

(3) Bessemer の twin-roll 方式の直接圧延機を使用して、直接圧延を行なう場合、ピンチロールの速度は、主ロールと同周速度か、多少速い周速度の場合に直接圧延が可能である。

(4) Bessemer の twin-roll 方式の直接圧延機を使用して、直接圧延を行なう場合、直接圧延速度を遅くすると、凝固直後の金属を圧延加工することができる。

なお直接圧延機を試作に御協力いただいた伸興工業株式会社小沢 章氏に深甚なる謝意を表する次第である。

Fig.6 Effect of the direct-rolling speed on the tensile strength, elongation and the hardness of the surface of direct-rolled plates.

び、表面硬度におよぼす影響を示す。それらの値は、直接圧延速度が無限大と考えられる水冷鋳型鋳造板に比較して、それが遅いほど高値が得られた。