

## ストレート・モールドを用いたローヘッド形連続鋳造法

岩 崎 武\*・岩 永 浩

（昭和63年10月31日受理）

### Low Head Continuous Casting Method with Straight Mold

Takeshi IWASAKI\* and Hiroshi IWANAGA

#### Abstract

In order to reduce height of a continuous casting machine without sacrificing its capability, unique design of the machine has been developed. Casting is made vertically to a straight mold, and the cast product is bent "progressively" inside a roller apron to bring it out horizontally. In this paper, the design philosophy of the machine is introduced together with the result of tests executed in the experimental machine; and the characteristic features of the method are discussed.

#### 1. 緒 論

鋼の連続鋳造設備は、最近において近代的工業規模の形態を整え、すでに製鉄工業の重要設備として欠くことのできない地位を築きつつある。これは、従来の造塊や分塊工程の省略化、歩どまり向上等による生産費の低減、機械化、連続化に伴う品質の均一化、ならびに労務対策の目的をもって、規模の大小や生産量のいかんを問わず採用された結果である。このような背景の中にあって、本鋳造法はさらに生産性の向上や保守管理の省略化のため、種々の開発、改良が行われてきたが、特筆すべき進歩は、多くの鋼種の鋳造に適し、なおかつ設備の高さを低くする形式の開発である。

上述の進歩した、高さの低い連続鋳造設備、すなわちローヘッド形連続鋳造設備について、理論考察と試験結果、および実用機の特徴と評価について報告する。（連続鋳造は、以下 C. C. と略記する。）C. C. 設備の高さを低くする必要性やその形式は、すでに多くの文献等において述べられており、 1 に示す各種形式の変遷を経てきているが、その目的を要約すれば次のとおりである。

- (1) 鋳込速度と、鋳片寸法の増大につれて冷却帯は長くなる。すなわち機械高さが高くなることに対処する。
- (2) 成品の取出しを簡素化する。
- (3) 鋳片の切断長さを自由に選択でき、かつ、これに伴う歩どまり向上が図れる。
- (4) 高温の溶鋼を処理するため、保守、安全上すぐれている。
- (5) 土木、建築費の低減や、既設造塊建家の利用。

---

\*現在東海大学第二工学部非常勤講師

上述のように現在のローヘッド形 C. C. 設備には多くの利点があげられる反面、考えられる欠点には次のようなものがある。

- (1) 垂直凝固形の C. C. 設備に比べて適用鋼種の制限を受ける。
- (2) 機高が低いため、架構内に付属機器の収納場所が少ない。かつ、機械本体の水平部分が長くなる。したがって、これらの設置床面積が大きくなる。

この中(1)の適用鋼種の制限に関して、現状では铸造技術の進歩と設備の改良ならびに鋼の凝固過程の研究により解明されている。すなわち、C. C. 設備の形式に起因する铸造鋼種の適否はほとんどない。2. に後述するように、内部に溶鋼が残っている铸片の場合でも、ひずみに関する許容値を適用した曲げ形式のものでは、品質に影響なく铸込むことができる。これについては、図1に示す各種曲げ形式の実績と凝固に関する研究から定量的に言える段階に達している。機高の低いローヘッド形式のものの中には、カーブド・モールドを使用した形式と、ストレート・モールドを使用したものの2種類が普及しているが本文中のローヘッド形とは後者のストレート・モールドを使用した湾曲形を指し、以前に発表した報告<sup>1)</sup>において述べられている設備上の各種特色をそのまま生かして、改良を加えたものである。

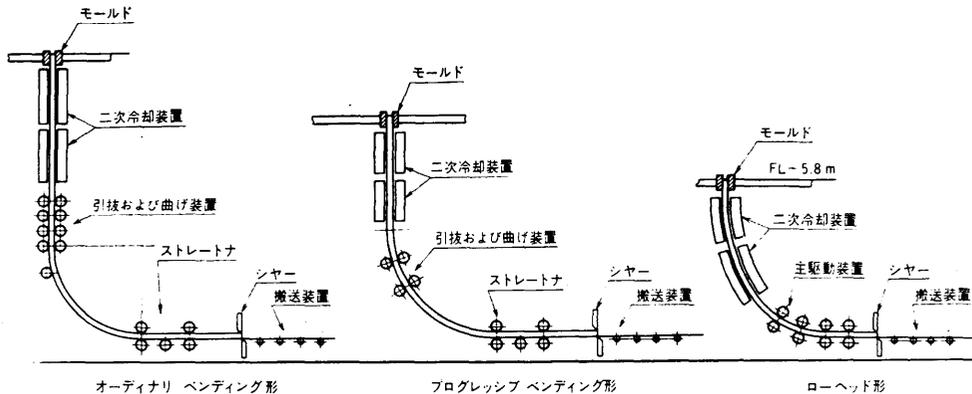


図1. オルソン式の各種形式

## 2. ローヘッド形 C. C. 設備の理論的考察

### 2. 1 高さの低い C. C. 設備の2形式

高さの低い C. C. 設備で、カーブド・モールドを使うものと、ストレート・モールドを使うものの2種類があることは前述のとおりである。モールドそのものの機能を考えれば、このカーブド・モールドがストレート・モールドよりすぐれている点はない。铸片からみても、

- (1) 冷却、凝固が対称に行われること。
- (2) いわゆるエアギャップの発生が均等に起こること。
- (3) 非金属介在物の浮上が容易で、かつその分布が対称になること。したがって高速铸造ができること。

など、いずれもストレート・モールドが有利であるし、また機構的に考えても精度のよいガイドが簡単にできる。さらに、銅モールドそのものの製作、修正、交換、保守、いずれを考えてもストレート・モールドがすぐれていることは明らかである。

カーブド・モールドを使った形式の利点として、モールドを出た铸片を、内部に未凝固部分

を残した状態では外部から曲げを与えることなく水平にまで導いていることがあげられる。確かにこの場合、いったん生じたクラックが、曲げに伴う鋳片の伸びによって拡大される危険性は少ないであろう。しかし、クラック発生の原因となる熱応力が無視できない程度に達することは、垂直形の場合の計測でも、エプロンに相当大きな“曲り”による反力を生じ、場合によってはバルジングによるものよりむしろ大きな引抜抵抗を示すことから容易に推測できる。

未凝固部分を残した鋳片を曲げることに関しては、従来のプログレッシブベンディング方式（図1）その他で十分に実績があり、それらのデータによれば、適当な曲げの形式をとることにより、鋳片になんら欠陥を生ずることなく、相当の曲げが可能であることが推測できた。

2. 2 曲げに関する考え方

鉛直に鋳込んだ鋳片を水平に近い方向に出す場合、モールド形式のいかににかかわらず、曲率をもった鋳片を、まっすぐに直すストレートナは不可欠である。そしてストレートニングは現象的には曲げと同じであるから、ある曲率をもってストレートナにはいり、ストレートニングされる鋳片を考えると、全然欠陥なしにまっすぐな鋳片を得るためには、許される曲率は当然制限を受ける。一方、ストレート・モールドから出る鋳片は曲率0であるから、この鋳片をストレートニングで許される最大曲率にまで曲げる方式が重要な意味をもつことになる。

曲げ方式で最も簡単なものは、図2(a)に示すように、適当な点で一定の曲率に曲げ、そのままストレートナまで送るもので、従来のオーディナリベンディング形の垂直部分を極力小さくした形式である。この方式も現在実用化されてはいるが、鋳片の品質から考えても、機械側からみても、次のような理由で必ずしも最上の方法とは考えられない。

(1) 曲げが1点で行われる結果、鋳片の受けるひずみ速度は非常に大きい。モールド直下では未凝固部分が多く、凝固した部分もいちばん外側でも1000℃以上という高温であり、変形に対する抵抗は変形の大きさより、むしろその速度に支配されることはクリープなどの研究からよく知られている。そして急激な曲げは抵抗が大きいとともに、いわゆるリラクゼーションの時間がないため、破損を起こしやすい。

(2) モールド下のストレート部分をあまり短くすると、曲げ反力がモールド付近まで伝わり、ここに精巧で大きな力に耐えるガイドが必要となる。このあたりは、スプレイ冷却の平等な分布が要求される場所であり、また、最もブレイクアウトの発生しやすい位置でもあるので、複雑になるのは好ましくない。

以上の諸点から考えて、この形式が十分使いうるのは、比較的小断面の鋳片を比較的低速で鋳込む場合と思われる。

ここで採用した曲げ方式は、図2(b)に示すように、従来のプログレッシブベンディングの原理を応用したもので、鋳込速度が一定の場合、モールド直下のある点からの鋳片の受けるひずみ速度が一定になるように曲げを与え、許容最大曲率まで変形させるものである。単純曲げ理論によると、真直ぐな鋳片を曲率 $\rho$ の円弧に曲げる場合に、中立軸から $x$ 隔たった点のひずみ $\epsilon$ は

$$\epsilon = \rho x \dots\dots\dots (1)$$

である。したがって曲率 $\rho$ が時間 $t$ とともに変化するとき、 $x$ の位置におけるひずみ速度

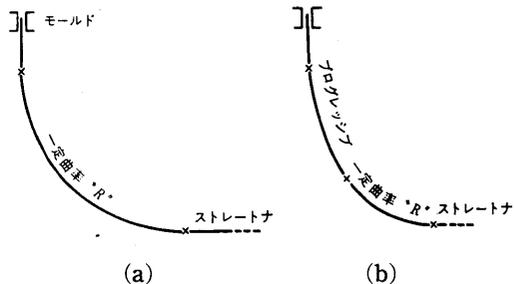


図2. ストレート・モールドを使ったローヘッドの2形式

$d\varepsilon/dt$  は(1)式を  $t$  で微分することにより

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = x \frac{d\rho}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

となる。すなわちひずみ速度は曲率の時間的变化に比例する。

一方、 $dt$  時間に鋳片が移動する量  $ds$  は、鋳片の速度を  $v$  とすると

$$ds = v \cdot dt \dots\dots\dots (3)$$

であるから、(2)式は

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = x \frac{d\rho}{ds} \frac{ds}{dt} = xv \frac{d\rho}{ds} \dots\dots\dots (4)$$

と書ける。この式から鋳片断面において中立軸から  $x$  だけ隔たった位置でのひずみ速度と、鋳込み速度を与えると、鋳片の軌跡を求めることができる。

$v$ ,  $x$  が一定のとき、ひずみ速度が一定という条件は  $d\rho/ds$  を一定に保つことを意味する。すなわち、定数  $\lambda$  を用いて

$$\frac{d\rho}{ds} = \frac{2}{\lambda^2} \dots\dots\dots (5)$$

と表すことができる。この関係を満足する鋳片の軌跡は Cornu の螺旋として知られている曲線となる。曲率半径を  $R$  とすると、 $R = 1/\rho$ だから、鋳片が距離  $s$  だけ移動する間に  $R$  が  $\infty$  から  $R_s$  まで変化するときには

$$\lambda^2 = 2sR_s \dots\dots\dots (6)$$

の関係がある。この場合のひずみ速度は

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{2xv}{\lambda^2} = \frac{xv}{sR_s} \dots\dots\dots (7)$$

として計算できる。この方式ではきわめて小さい力で曲げることができ、鋳片が破損するおそれがないばかりでなく、モールド付近に曲げ反力がほとんどない状態で機械高さを低くできることが試験機で確認された。

### 3. 試験機

#### 3.1 概要

すでに述べたように、“適当な曲げ方式を選ぶことによって、ストレートモールドを使用しても、機械高さはカーブド・モールドを使ったものに匹敵しうる”という見通しを得たので、これを実際の鋳片で確認するため、実用規模の試験機を設置した。タンデッシュ、モールドならびに主駆動装置などは、荷重、トルクなどの計測が容易にできるように特別な工夫がなされた以外は、在来の C. C. 設備の特徴をそのまま生かして設計、製作したが、曲げを伴う二次冷却部分の設計には、前もって約  $1/5$  のモデル実験装置を製作し、鉛およびアルミニウムの角材を用いて、一般に発表されている諸形式の曲線に沿って引き抜きテストを行って、曲げ反力、引抜抵抗力を測定し、これを参考にして設計を進めた。

試験機のおもな仕様は表 1 のようになっている。

この設備は第 1 回の試験以来、ユーザなどに対する公開試験を含めて、各サイズおのおの数十回の試験を実施した。

#### 3.2 試験経過

計画した試験は次のようなプロポーシオンにより、各段階に分けている。

表1. 試験機要目

|         |                                       |
|---------|---------------------------------------|
| 形 式     | ローヘッド形 (垂直形兼用)                        |
| 鑄片寸法    | 120 mm 角, 120×420 mm, 200 mm 角        |
| レードル容量  | 最 大 15 t                              |
| 機 械 高 さ | 鑄込床 FL+6 700 mm<br>搬出バスライン FL+ 920 mm |
| 最小曲率半径  | 3 600~2 000 mm (可変)*                  |
| λ       | 5 000~4 000 mm (可変)*                  |

\* 二次冷却装置のローラ エプロンを修正し、主駆動装置の配置を変えることによつて、変更することができる。

表2. 試験鋼産と成分

| 鋼 種      | 化 学 成 分       |      |      |
|----------|---------------|------|------|
|          | C             | Si   | Mn   |
| S 10 C   | 0.10          | 0.25 | 0.50 |
| S 15 C   | 0.15          | 0.25 | 0.50 |
| SM 41 B  | 0.16          | 0.20 | 0.70 |
| SS 41 B  | 0.14          | —    | 0.50 |
| S 25 C   | 0.25          | 0.25 | 0.60 |
| SWRH-1   | 0.30          | 0.20 | 0.50 |
| S 30 C   | 0.30          | 0.25 | 0.60 |
| S 35 C   | 0.35          | 0.25 | 0.70 |
| S 45 C   | 0.45          | 0.25 | 0.70 |
| SWRH-3   | 0.50          | 0.25 | 0.55 |
| S 50 C   | 0.50          | 0.25 | 0.70 |
| SWRH-6 B | 0.78          | 0.25 | 0.70 |
| SUS 27   | Ni: 8, Cr: 18 |      |      |
| SUS 24   | Cr: 18        |      |      |
| けい素鋼板材   | 0.06          | 3.34 | 0.25 |

- (1) ビレット 120mm角 λ=5000mm  $R_{min}=2000mm$
- (2) スラ ブ 120×420mm 垂直
- (3) 同 上 120×420mm λ=4140mm  $R_{min}=3500mm$
- (4) ビレット 120mm角 λ=4140mm  $R_{min}=3500mm$
- (5) ブルーム 200mm角 λ=4000mm  $R_{min}=3600mm$

すでに試験を行った鋼種を表2に示す。

引抜速度は、ビレットの場合平均2.0~3.0m/min, 最高3.8m/min, スラブでは平均0.8~1.6m/min, 最高2 m/min, また比水量は、0.9~2.0 l/kg steel の範囲で試験を行った。各試験でモールド振動変位, 加速度, 押上力, エプロン引抜抵抗, 曲げ反力, 鑄片表面温度などの計測を行ったほか, 数回の試験で S, Pb および R. I. による凝固シェル厚さの測定および凝固途中の鑄片に特殊鋼製のピンを打ち込み, 凝固組織の研究を行っている。さらに試験としては, モールド液面に使用するパウダに関するもの, 新しいアイデアによる Al のモールド添加なども実施している。

### 3. 3 凝固速度

鑄片凝固速度および完全凝固時間を詳しく計算するためには, 溶鋼温度, エンタルピー, シェルの熱伝導率, 表面熱伝導率を求め, 伝熱の式を用いるが, ごく簡単に見当をつけるためには, 通常いわゆる“Lightfootの凝固式”

$$y = K\sqrt{t} \dots\dots\dots (8)$$

が使われている。ここに,

y: 凝固厚さ, t: 時間, K: 定数

これは一定温度の液体が, 外壁温度を一定にして外側から一次的に凝固する場合に相当する。したがって厚さに比べて, 幅が十分広いスラブ等では比較的良好に合うが, 断面が正方形

に近づくと当然偏差がはなはだしくなる。そこで、われわれはこの式を二次元対称凝固の条件で修正し、たとえば正方形断面の場合次の式を用いている。

$$\left(1 - \frac{y}{a}\right)^2 \ln\left(1 - \frac{y}{a}\right) - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{y}{a}\right)^2 + \frac{1}{2} = \frac{K^2}{a^2} t \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $a$  は鋳片厚さの $\frac{1}{2}$ である。

一次元の式を同じ式にすると、

$$\frac{y^2}{a^2} = \frac{K^2}{a^2} t \dots\dots\dots (10)$$

$y/a$  と  $(K^2/a^2)t$  の関係を図示すると、図3のようになる。完全凝固に要する時間は、 $y=a$  として、

$$\text{一次元の場合：} t = \frac{a^2}{K^2} \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{二次元の場合：} t = \frac{a^2}{2K^2} \dots\dots\dots (12)$$

となる。

この式の定数  $K$  は、“ $K$  value”としてよく知られているもので、スプレイ水量とその分布、溶鋼の温度のほか引抜速度などにも関係する。しかしあらい近似の場合には、比水量すなわち鋳片の mass-velocity あたりのスプレイ水量の関数として現すことが多い。これに関しては多くの報告<sup>2)</sup>があるが、この装置の実測値によれば、だいたいの傾向は図4のようになる。いま120 mm角を鋳込む場合、比水量を2.0 l/kg steel,  $K = 29 \text{ mm/min}^{\frac{1}{2}}$  とすれば凝固時間は、

$$t = \frac{a^2}{2K^2} = \frac{60^2}{2 \times 29^2} = 2.14 \text{ min}$$

鋳込速度を2.5 m/min とすれば、凝固長さ  $L$  は、

$$L = 2.14 \times 2.5 = 5.35 \text{ m}$$

と概算される。これは比水量1.9~2.2 l/kg steel, 鋳込速度2.3~2.5 m/min の場合の実測値5.3~5.9 mに、割合近い値を与えている。

### 3. 4 曲げ速度

120mm角ビレットの場合、外壁のひずみ速度を計算すると、鋳込速度2.5 m/min,  $\lambda = 5 \text{ m}$  の場合、

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{2aV}{\lambda^2} = \frac{2 \times 0.06 \times 2.5}{5^2} = 1.2 \times 10^{-2} \text{ l/min}$$

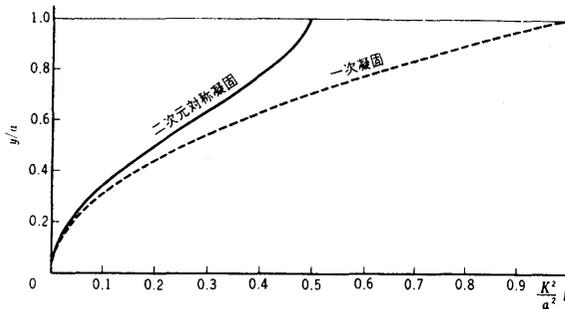


図3. 凝固曲線

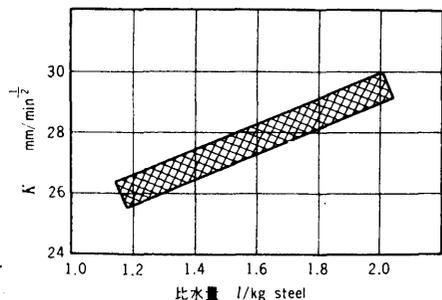


図4. 比水量と K value の関係

この場合の応力を、文献の一例<sup>3)</sup>から求めてみると(図5), S20C で1150℃の場合,  $\sigma=3.0$  kg/mm<sup>2</sup>となる。この文献の実験値は鋼材を加熱し, 圧縮して測定したものであるが, 試験機による反力の測定値から推定して, 比較的よい値と考えられる。

#### 4. 試験結果

##### 4.1 凝固パターン

図6にスラブ, ビレットについて, 各鋼種の成品のマクロ写真およびサルファプリントの例を示し, 表3にその鋼種を示す。

マクロ写真には, 結晶が明りょうに現れるステンレス鋼, けい素鋼を特に選んで示した。なお, 図7には, R. I. による凝固シェル測定結果の例を示す。多くの断面のマクロ写真, サルファプリント, R. I. による凝固シェルの測定結果などを検討して, 次のことがわかった。

- (1) 120mm角ビレットについては, 凝固パターンは在来方式と違う点はない。したがって, スプレイ水分布も特に変える必要はなく, center-porosity についても従来のものと全く同じと考えてよい。
- (2) 120×420mmスラブの場合は, 上, 下面のスプレイ水を別々に調整する必要がある。そして重要な点は, かけるスプレイ水量分布に加えて, 流れ落ちる水を処理する方法である。水切りが不適當であると, 上面ではロール間に水たまりができ, これが外側に回るため端部が過冷却になるおそれがある。
- (3) 偏析についても, 曲げの影響はほとんどみられない。この点についても在来形式と同じと考えてよい。なお表3の b-6, b-7 にピン打込み試験の結果を示す。これは運転中の C. C. 機の二次冷却出口付近において, 特殊ガンによりピンを打込んだもので, 凝固シェル組織の変化と, ピンの材質の変化から凝固状況を知ろうとするものである。

##### 4.2 曲げによる現象

前掲のサルファプリントでもある程度推測されるように, 適当な条件で鋳込めば曲げによる材質欠陥は起こらない。試験した範囲では, 外部割れは全然問題にならなかったが, いわゆる crack-sensitive な元素の含有量が過剰になると, 在来型でみられたように内部クラックを生ずる傾向が現れる。これらのクラックは, 通常内部が酸化されていないので, ごくわずかの圧延でも圧着する。実験によれば, 相当激しい内部クラックをもつものでも, 3:1程度の圧延で消えるし, 約10%程度ピンチロールによる直接圧下を加えても大幅に改良されることがわかった。また, このクラックの発生する位置は, 成品で調べると, 中心より弧の外側に寄った部分に比べて, 弧の内側に近い部分に多い傾向がある。これは鋳片がストレートニングされるとき, 内側に割れが発生しやすいことと, 外側は圧縮側となるため圧着されるものがあることを意味している。

一方, 曲げに起因する反力は予想されたように比較的小さく, しかもモールド出口や, エプロン上部では特に小さくなっている。120mm角,  $\lambda=5.0$  m で定常状態の場合のエプロン内反力の一例を図8に示す。

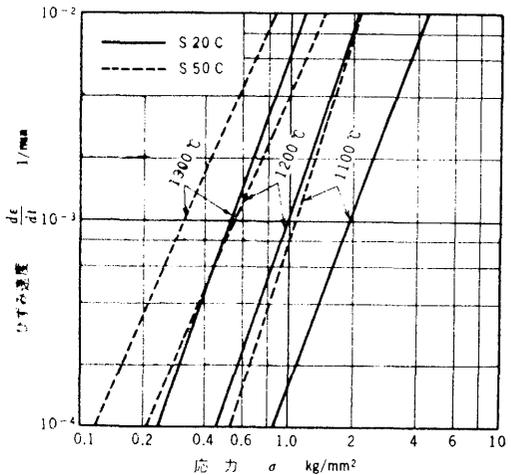


図5. 炭素鋼の高温におけるひずみ速度と応力の関係(定常圧縮)

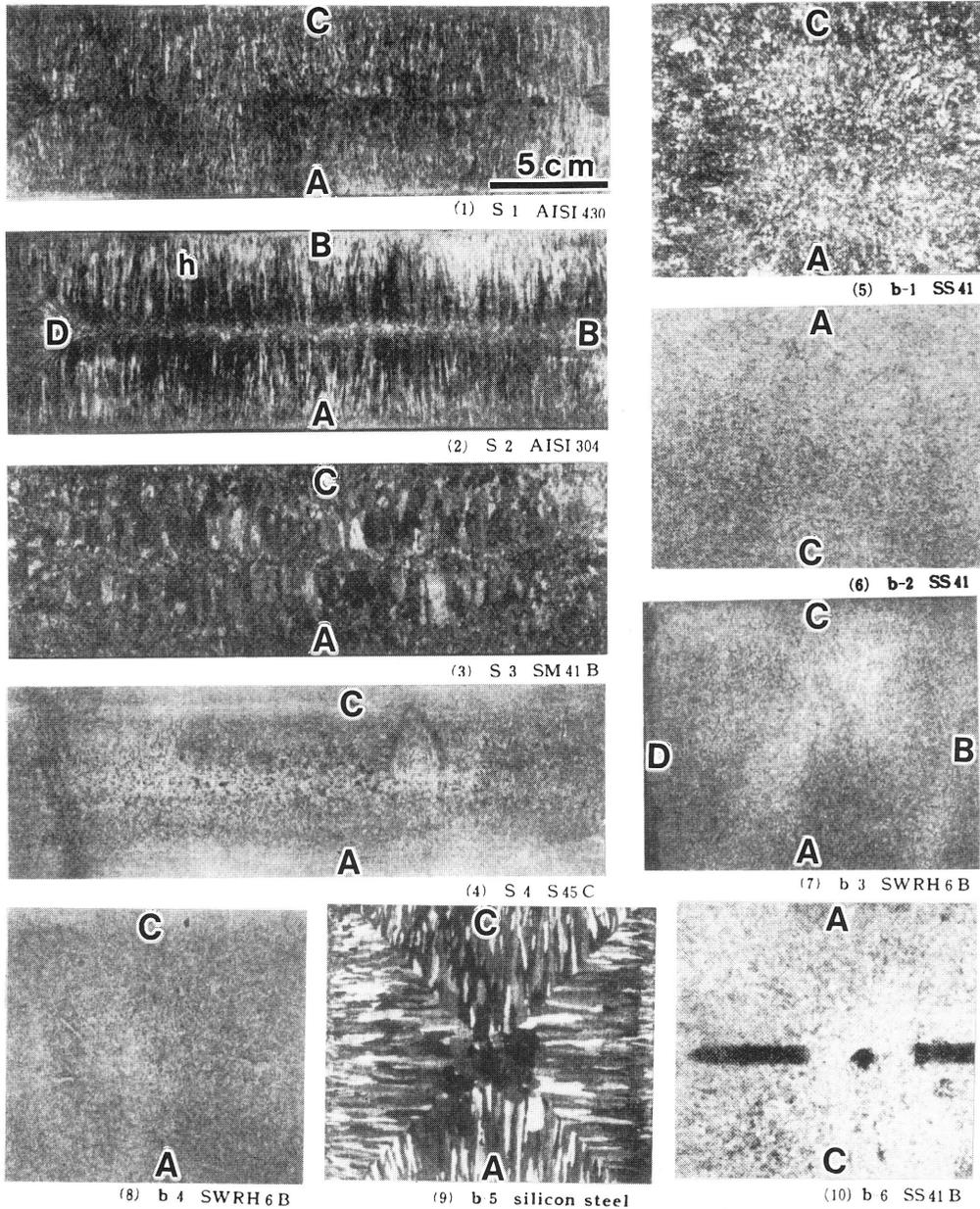


図6. マクロ写真とサルファプリント

#### 4. 3 鑄込速度

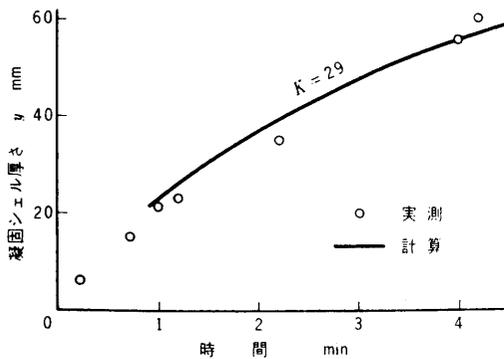
試験した最高速度一約3.8m/min-においても、 $\lambda=5.0$  mの曲線でなら支障なく鑄込ができた。これはストレート・モールドの利点を示すものであるが、必ずしもこの値が限界を意味するものではない。120mm角程度のピレットで鑄込速度の制限となる要因は、主として、

- (1) 流入する溶鋼が多くなると、モールド内の流れが乱れること。
- (2) それにつれて酸化物などの浮上が困難になり、介在物がふえること。

表 3. マクロ写真 (図 6) の説明

| 番 号      | 鋼 種                      | テスト<br>段階* | 写 真       | 摘 要              |
|----------|--------------------------|------------|-----------|------------------|
| (1) S-1  | AISI 430 (18 Cr SS)      | 〔Ⅲ〕        | マ ク ロ     | 垂 直 形            |
| (2) S-2  | AISI 304 (18 Cr-8 Ni SS) | 〔Ⅱ〕        | ”         |                  |
| (3) S-3  | SM 41 B (C 0.16)         | 〔Ⅲ〕        | ”         |                  |
| (4) S-4  | S 45 C (C 0.45)          | ”          | サルファ プリント |                  |
| (5) b-1  | SS 41 (C 0.14)           | 〔Ⅰ〕        | マ ク ロ     |                  |
| (6) b-2  | 同 上                      | ”          | サルファ プリント |                  |
| (7) b-3  | SWRH 6 B (C 0.78)        | ”          | マ ク ロ     |                  |
| (8) b-4  | 同 上                      | ”          | サルファ プリント |                  |
| (9) b-5  | けい素鋼板素材 (Si 3.4)         | 〔Ⅰ〕        | マ ク ロ     | ピン打込試験<br>同上拡大写真 |
| (10) b-6 | SS 41 B                  | ”          | ”         |                  |
| (11) b-7 | 同 上                      | ”          | ”         |                  |

\* 〔Ⅰ〕 120×120 mm  $\lambda=5.0$  m  $R_{min}=2.0$  m  
 〔Ⅱ〕 120×420 mm 垂直 ストレート  
 〔Ⅲ〕 同 上  $\lambda=4.14$  m  $R_{min}=3.5$  m



(120×420 mm, 引抜速度 1.0 m/min, 比水量 1.55)

図 7. Radio-isotope による凝固シェル厚さと測定結果

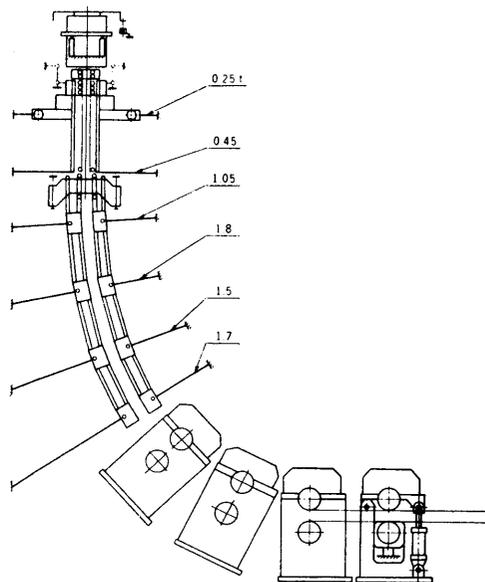


図 8. エプロン反力

(3) モールド液面で除去を要するスラグの量が増し、人手による除去が間に合わなくなる

と。

などである。120×420mmのスラブの実験で、浸せきノズルとパウダの組合わせて鑄込を行ったが、この場合は上記条件が大幅に緩和されることがわかった。

## 5. ストレート・モールドを用いたローヘッド形 C. C. の特徴

ストレート・モールドはカーブド・モールドに比べて、それ自体価格が低廉で寿命が長いだけでなく、鑄込みに際しては凝固の偏りが少なく、高い鑄込速度が得られる。また凝固時に発生する欠陥も少なく、適用できる鋼種の範囲も広い。このモールドを使い且つローヘッドとするために未凝固部分を含む鑄片を曲げる場合に、そのひずみ速度を適当に選ぶことにより、従来垂直形で鑄造されていた殆ど全部の鋼種を鑄造することができ、品質にも問題のない製品が得られることがわかった。

このような C. C. 設備は、モールド部分、曲率が増加する部分、一定曲率部分およびストレートニング部分から構成されるが、曲率の変化を一定として各機器を配置することにより、鑄片はモールドを出たあと極めて僅かの曲げ力で一定曲率に導かれる。したがって曲率増加部分のガイドに必要な強度は垂直形の場合と大差なく、構造も簡単である。この他の部分に使用される装置、たとえばモールドレベルコントロール、鑄片切断用油圧シャーなどは在来の垂直形、オーディナリ・ベンディング形と同様のものが利用できる。特にストレート・モールド用に開発されたストリーム・センタリング装置は、曲げ開始点を中心とした球面上でモールド装置を前後左右に移動してタンディッシュからのストリームを常にモールド中心で受けるもので、ビレットを鑄込む場合に凝固の偏りやブレイクアウトを防ぐのに有効である。

曲率が変化する部分をもつために懸念される点として、鑄込み中に事故による引き抜き不能という事態が発生したときの対策がある。このような場合でも鑄形温度がある程度（例えば低炭素鋼で800℃）以上ある間に引き抜きが可能になれば鑄片は通常の操業と同様に引き抜くことができる。万一完全に冷却してしまった場合には、エプロンロールと引き抜きロールの間隔を最大限に開いて、一定の長さずつ送り出し切断することによって短時間に除去できることが確認されている。

## 参 考 文 献

- 1) 仲沢雪男, 竹原鋭郎: 三菱重工技報 2, 6号 (1965) 665.
- 2) W. Holzgruber and B. Tarman: Huttenmannische Monatshefte 111 Heft 5 (1966) 199.
- 3) 沖進, 佐藤一雄: 鉄と鋼 53, 7号 (1967) 72.