

論 文

UDC 621.746.27.047 : 536.421.4

ウォーキングバー (W. B.) 間接冷却方式曲型連続鋳造機の冷却能の解析とその品質に関する 2, 3 の考察*

森 隆資**・長岡 豊***・綾田 研三***・副島 利行****

Some Study on Cooling Capacity Analysis of Walking Bar Indirect Cooling Type Curvilinear Continuous Casting Machine and Quality of the Slab

Takasuke MORI, Yutaka NAGAOKA, Kenzo AYATA, and Toshiyuki SOEZIMA

Synopsis:

The Kobe Steel has built a W. B.*)-curvilinear type continuous casting machine at Kakogawa plant; this machine has a special indirect cooling system named W. B. in its upper part of the secondary cooling zone.

Solidification constants, K 's of this machine are as follows:

- (i) Mold zone $K_M=29.8$ (mm min^{-1/2})
- (ii) W. B. zone $K_{W.B.}=23.9$ (")
- (iii) Roller zone $K_R=21.9$ (")

An analytical simulation of cooling capacity has been made by a computer.

As a result, the average heat transfer coefficient of W. B. zone is found about 320 kcal/m² hr°C, and the average heat transfer coefficient of W. B. is 360 kcal/m² hr°C when it contacts with the slab surface. The components of them are as follows:

- (i) Radiation 270 kcal/m² hr°C
- (ii) Convection (gas) 48 kcal/m² hr°C
- (iii) Contact 42 kcal/m² hr°C

Concerning the quality of the product, the following characteristics are obtained:

- (i) The slab is kept in good uniformity, so the error in the weight per unit length is within a 0.5% deviation.
- (ii) The equiaxial crystal zone occupy about 30% of the slab width in a usual slab.
- (iii) The centerline segregation is slight.
- (iv) Few large inclusions can be found.

(Received Jan. 28, 1974)

*1 W. B.: Walking Bar

1. 緒 言

当社が 1972 年 5 月、加古川製鉄所に建設を開始した W. B.(ウォーキングバー) 間接冷却方式曲型連続鋳造機は現在定常稼働により月間 8 万 t を生産している。この連続鋳造機の大きな特徴は鋳型直下の 2 次冷却帯頭部に walking bar(ウォーキングバー) 方式と呼ぶ駆動兼備の間接冷却方式を採用し、スラブ鋳片のバルジング防止を行ない、引抜きは W. B. の運動と同期する後段の各駆動

ロールが分担し、いわゆるスプレー冷却様式にみられるピンチロールは設けられていない点である。

これまで、スプレー冷却方式の連続鋳機は国の内外を問わず多数建設され、すでに数多くの詳細な報告¹⁾²⁾⁷⁾⁸⁾ が

* 昭和 48 年 10 月本会講演大会にて発表
昭和 49 年 1 月 28 日受付

** (株) 神戸製鋼所中央研究所 工博

*** (株) 神戸製鋼所中央研究所

**** (株) 神戸製鋼所加古川製鉄所

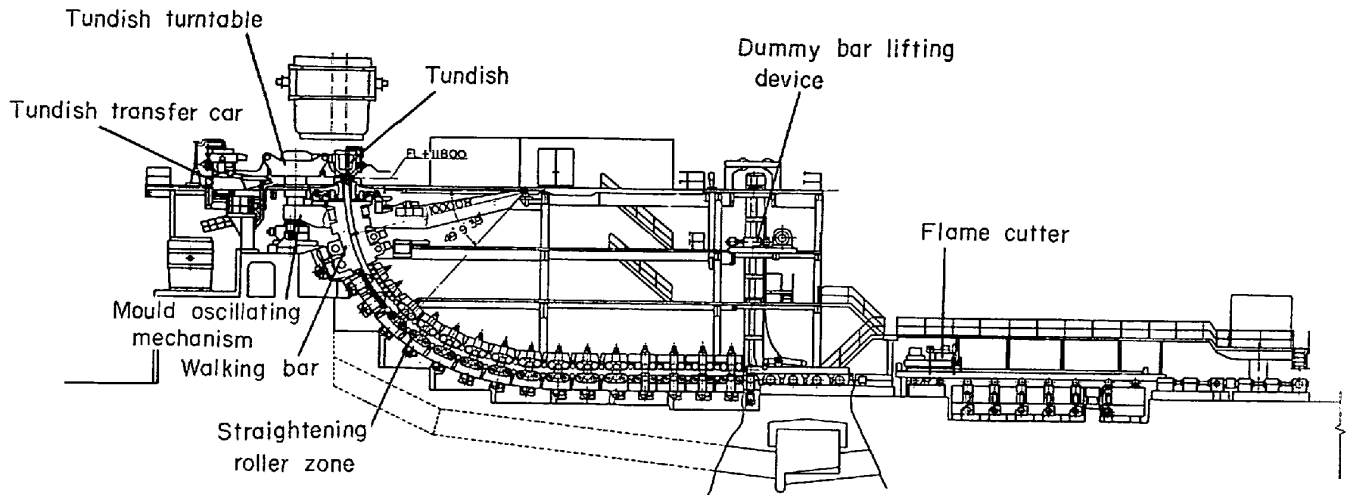


Fig. 1. Side view of the curvilinear continuous casting machine.

Table 1. Major Specifications.

| | |
|------------------------|---|
| Type of machine | Walking-bar curvilinear type |
| Number of strand | 2 |
| Capacity of ladle | 240 T/Heat |
| Size of slab | Thickness : 200 mm, 250 mm, 300 mm Width : 900-2 100 mm Length : 6 000-12 000 mm |
| Secondary cooling zone | First stage : Internal water cooled walking bars (motor driven) Second stage : Internal water cooled rolls |
| Casting speed | Maximum casting speed : 1.8m/min (slab thickness 200 mm) 1.2m/min (slab thickness 250 mm) |
| Length of machine | Total : 28 382 mm Circular arc zone : 9 181 mm Straightening zone : 10 813 mm Horizontal zone : 8 388 mm |

なされている。そこで本報告では、間接冷却方式の連続鋳造機により鋳造されたスラブの凝固過程を、鋳型内サルファー添加法、高速鋳打法*により部分的に調査し、鋳片内の連続的な凝固殻厚さの変化、いいかえると操業が安定した時期における熱伝達係数と凝固殻厚さとの関係を2次元伝熱モデルを用いてシミュレートし、実測では求めがたいW.B.領域などの実用機における熱伝達係数を求めるとともに、鋳片内外の品質についても一部調査したので、これらの諸結果をまとめて報告する。

* 本鋳打法は三菱重工工業株式会社の特許(S46-21092)であり、御好意により使用させていただいた。

2. W. B. 間接冷却方式曲型連続鋳造機の概要

本連続鋳造機の概観を Fig. 1 に、その性能および諸元を Table 1 に示す。本機の機構上の特徴は緒言で述べたごとくであるが、これらの特徴を生かすために、機構的には以下の配慮が施されている。鋳型は鋳造中の熔融金属の液面がその曲率中心を通る水平面から一定の距離になるようにオシレーションフレームに装着されている。鋳型下のW.B.装置は鋳型と同じ半径の円弧上に配置されているため、水冷板で構成されるW.B.領域を通過する鋳片は変形することなく鋳型内で形づくられた曲率を保ちながら凝固が進行する。矯正領域では $1.0 \sim 3.0 \times 10^{-5}$ /secの低歪速度で矯正を行ない、つぎに、凝固が完了する所要2次冷却領域長さを得るための水平領域へと移行する。W.B.領域以降の各ロールはその大部分が内部冷却され、機械の保守を容易にすると同時にスラブ形状の安定化にも役立つ。今後、取扱い鋼種の多様化、鋳片断面の大型化などに伴い、大単重で大熱容量の鋳片を低熱伝達係数を保ち、しかもバルジング変形を防ぎながら製造する必要が生じるものと考えられ、この種の連続鋳造機に関する特性の把握が重要課題となると思われる。

3. 伝熱計算による連続鋳造シミュレーション

2次冷却部頭部に間接冷却方式を用いるW.B.間接冷却方式曲型連続鋳造機の冷却能を知るため、2次元非定常伝熱偏微分方程式をもとにした連続鋳造シミュレーションに関するプログラムを作成し、電子計算機により計算を行なった。また硫黄添加法および鋳打ち法*により凝固殻厚さをモールド内、W.B.以降の部分について測

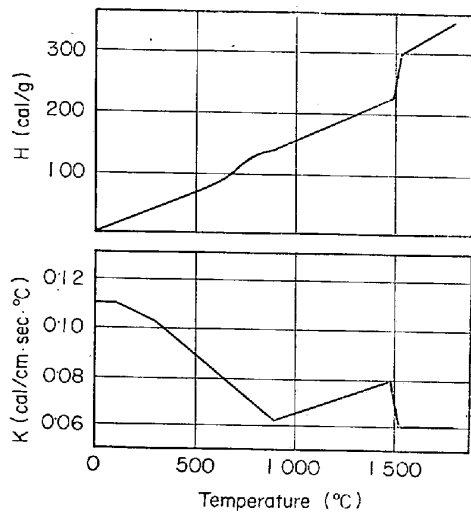


Fig. 2. Heat content per unit weight and thermal conductivity of low carbon steel.

定し、境界条件を種々変えた計算結果との比較を行なった。

3.1 計算方法

連続铸造の熱解析法には HILLS³⁾ らの解析的方法と微分方程式が伝熱計算と同じ形になる電圧や液体の圧力を利用したアナログシミュレーション法⁴⁾⁵⁾、さらに電子計算機を使つてインゴットの温度分布を求める ADENIS³⁾、MIZIKAR⁷⁾ らの数値計算法がある。ここでは物性値が温度に依存して変わるとして ADENIS、MIZIKAR らの方法を参考に計算を行なった。また W. B. 部ではスラブ広面側は間接冷却、狭面側は直接冷却と冷却方式も異なるため 2次元の伝熱式を採用した。(1)式に 2次元非定常偏微分伝熱方程式を示す。熱伝導度 K が温度に依存するため (2) 式に示す特性温度 ϕ を用いて (1) 式を書きかえ (3) 式および (4) 式を得た。

$$C \cdot \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \dots (1)$$

$$\phi = \int_{\theta_a}^{\theta} \frac{K}{K_a} \cdot d\theta \dots (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D(\phi) \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \dots (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{K_a}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) \dots (4)$$

ここで、 C : 比熱、 ρ : 密度、 K : 熱伝導度、 ϕ : 特性温度、 θ : 温度、 H : 含熱量、 $D(\phi)$: 熱拡散率、添字 d は基準温度における値を示す。Fig. 2 に本計算に使用した K と H の値⁹⁾ を示す。(4)式を差分近似 (explicit 法) により計算を行なった。本計算における設定条件は以下に示すとおりである。

(1) 凝固時に発生する凝固潜熱は鋼の含熱量に組入

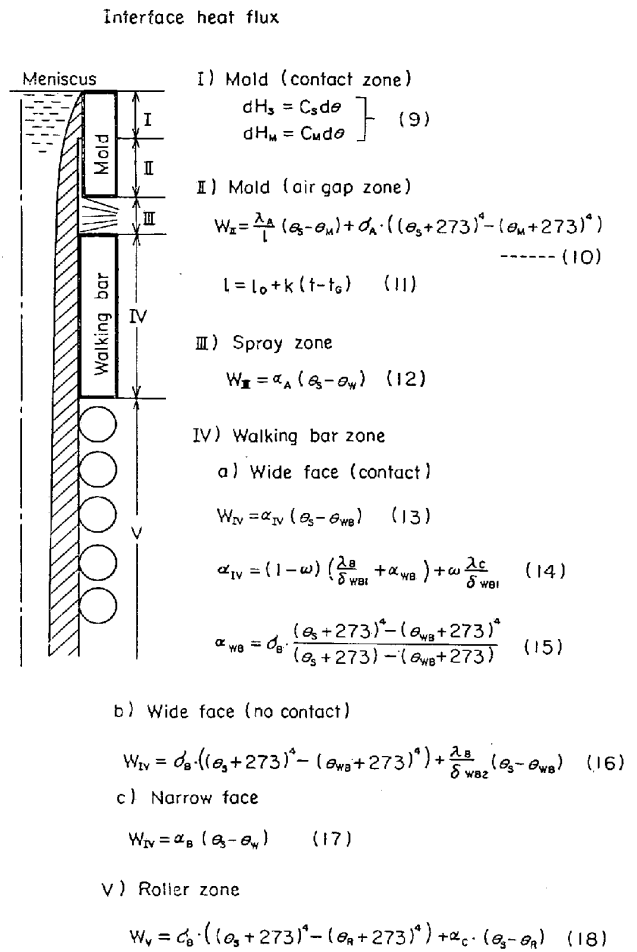


Fig. 3. Interface heat flux.

れる。

- (2) 対流の影響はない。
- (3) 密度の変化はない。
- (4) 熱移動は引抜き方向に直角な方向のみで、引抜き方向にはないとする (引抜き方向の温度勾配が小さく、この方向の熱移動は無視可能である。)

3.1.1 境界条件

MIZIKAR らの方法と同様、連続铸造の境界条件として以下のものが挙げられる。

(i) 鑄型内メニスカスにおける溶鋼の温度は鑄込温度とし、鑄型と接する境界の温度は、(5)および(6)式により求めた。

$$\sqrt{\frac{K_M \cdot \tau}{C_M \cdot \rho_M}} \cdot C_M \cdot \rho_M \cdot \delta \theta_M = \sqrt{\frac{K_S \cdot \tau}{C_S \cdot \rho_S}} \cdot \rho_S (C_S \cdot \delta \theta_S + L) \dots (5)$$

$$\delta \theta_S + \delta \theta_M = (\text{鑄込温度}) - (\text{鑄型初期温度}) \dots (6)$$

τ : 微小時間、 L : 鋼の凝固潜熱

S, M : それぞれ鋼、鑄型 (純銅) を示す。

(ii) スラブ中心部の温度勾配は、中心線を境にして

温度分布が左右対称になることから

$$K \frac{\partial \theta}{\partial x} = K \frac{\partial \theta}{\partial y} \equiv 0 \dots\dots\dots (7)$$

(iii) 鋼塊表面からの熱抽出量はスラブの引抜速度に応じて

$$-K_d \frac{\partial \phi_s}{\partial x} = W(t) \left(-K_d \frac{\partial \phi_s}{\partial y} = W(t) \right) \dots\dots\dots (8)$$

(ϕ_s は表面温度)

と各冷却領域を通過する時間に応じて変化するとした。なお、各冷却域の抽出熱量を Fig. 3 に示す。

a) 鑄型内密着域

スラブ表面と鑄型の表面は完全に密着しているため、伝導により熱が伝わり、(9)式と(8)式および(4)式より境界温度が求まる。

b) 鑄型内空隙形成域

凝固殻厚さがある程度以上になると、スラブ凝固層は鑄型壁からはなれて空隙を形成する。この領域では熱移動は放射と空隙内に存在するガス(おもにフラックスから発生するガス)を介した伝導による。

c) スプレー域

鑄型と W. B. との間に存在するスプレー領域であり、鑄型と W. B. とがそれぞれ異なる周期で上下運動をするための動き代として設けてある。この間隙は 30 mm 前後であるがこの部分で凝固殻が復熱し、バルジングをおこしブレイクアウトの発生因とならないようにスプレーによる冷却を行なっている。スプレー冷却水量の熱伝達係数への換算は三塚氏の実験結果⁹⁾によった。

d) W. B. 領域

この領域では W. B. がスラブ表面と接触、分離を周期的に行なっており、狭面側ではスプレー冷却が行なわれている。まずスラブと W. B. が接触している場合であるが、この場合にもスラブと W. B. それぞれの表面に存在する凹凸のため、両者が完全に接触している面積はごくわずかである。この部分では伝導によつて熱が伝わるが、残りの大部分は凹凸の高さだけがいにはなれており、空隙に存在するガスを介した伝導と放射により熱が伝わる。つぎにスラブ表面から W. B. が離れた場合であるが、この場合は放射とガスを介した伝導により熱が伝わる。狭面側はスプレー冷却であるため c) の場合と同じ考え方を行なう。

e) ローラー領域

この領域ではスラブ表面に並ぶローラーが回転することによりローラー表面の温度はスラブ表面との接触に応じて上下するが、ここでは平均温度をとり、一定として計算した。ローラーとスラブ表面の接触は線接触であ

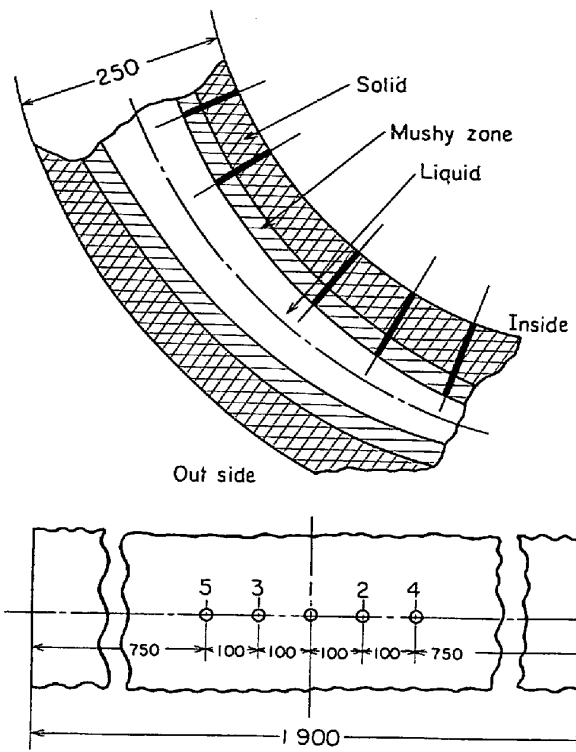


Fig. 4. Positions of rivets driven into slab.

り、さらにスラブ、ローラー表面の凹凸のため実際に接触している部分はきわめてわずかであると考えられるため、伝導による伝熱は無視し、伝熱は放射と対流によつて行なわれるとした。

3.2 鉚打ち法による凝固殻厚さ測定

スラブ鑄片の凝固殻厚さに関して計算結果と実測値とを比較するために鉚打ち法により凝固殻厚さ(完全固相厚さ)を測定した。鉚は Fig. 4 に示すように W. B. 以降の曲げの内側へ、適当な間隔でロールの間から 5 点打った。鉚はスラブが一定の速度で引抜かれているときに W. B. 下端から下へ向つて順次打たれ、打たれた鉚が Fig. 4 の下図のように一直線に並ぶようにした。Fig. 5 に打込まれた鉚と周辺のマクロ組織を示す。液相線の位置は(a)の鉚形状が保存されている限界の点から比較的容易に求められるが、これは見かけ上の固相先端位置で計算上の液相線温度とは対応しない。したがつて計算値と実測値との対応を行なうに必要なものは固相線位置である。固相線位置を求める第 1 の方法はサルファープリントにより、求めた鉚内のサルファー濃化点を鉚の材質(SCM 4)の固相線温度到達点とし、先に求まっているスラブの液相線位置とこの両点間で温度勾配が一定であるとし、比例配分により外挿して求める。第 2 は Fig. 6 に示すように同じスラブ内で鉚打ちの影響のおよばない鉚先端隣接の場所の dendrite 2 次アームの間隔か

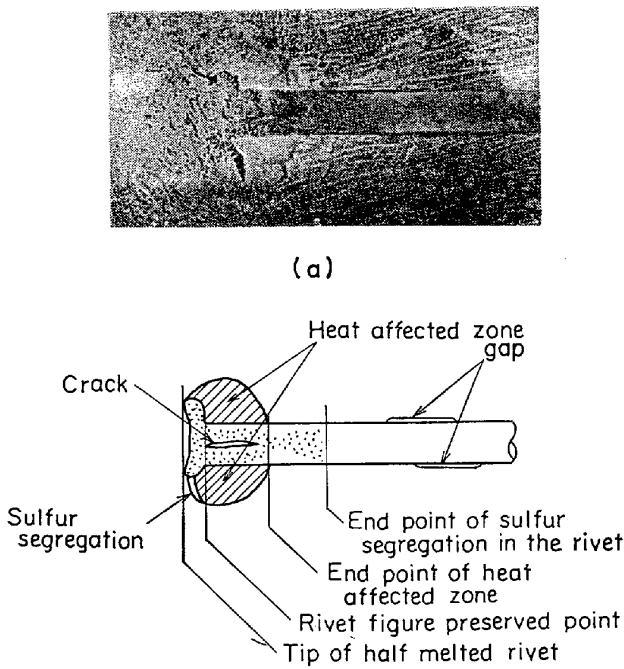


Fig. 5. Micro-structure and schematic diagram of driven rivet tip.

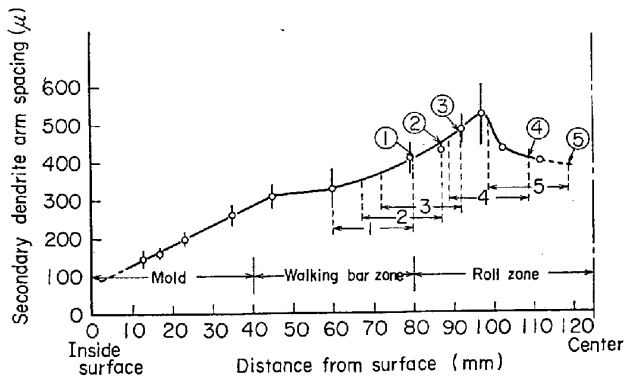


Fig. 6. Relation between secondary dendrite arm spacing and distance from surface.

ら、スラブ鑄片内各位置での冷却速度を求め、この冷却速度と鋳打ちにより求めた液相線の前進速度とから(19)式により温度勾配を求め、これらからスラブ内固相線位置を比例配分により求める方法である。

$$G = R/V \dots\dots\dots (19)$$

3.3 計算結果

鋳打ち法により求めた凝固殻厚さの変化と計算結果とを Fig. 7 に示す。また同時に放射温度計を用いて測定したスラブ広幅面中央の表面温度測定結果も図中にプロット (黒丸) した。凝固殻厚さ、すなわち液相線位置から上記 (3.3) 方法で逆算した固相線位置の実測値に上限と下限を示してあるが、上限は第1の方法で、下限は第2の方法で求めた結果である。計算結果はこの範囲の

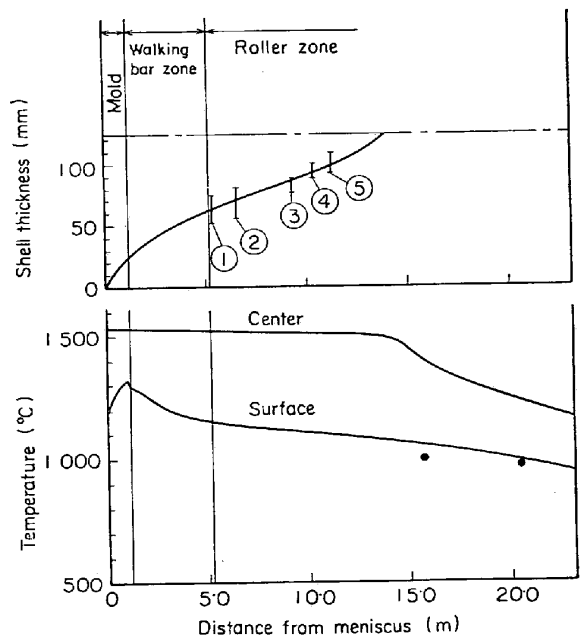
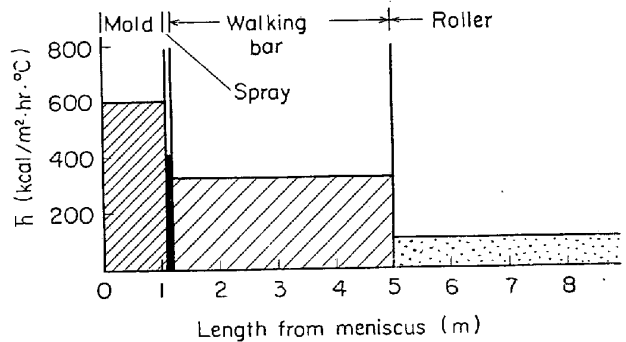


Fig. 7. Comparison of calculated and experimental results.

Slab size: 250×1900
Withdrawal speed: 0.5m/min.
Casting temperature: 1530°C

Table 2. Average heat transfer coefficient in each zone (kcal/m².hr.°C).

| Mold | Spray zone | Walking bar zone | Roller zone |
|------|------------|------------------|-------------|
| 600 | 400 | 320 | 100 |



ほぼ中央を通過し、表面温度の実測値ともよい一致を示している。最終凝固部は引抜方向の物質移動、あるいは熱流も無視できなくなるので計算結果とは多少異なつてくると考えられる。凝固殻厚さが 80% の所までは実測によつて確かめられているので問題はないといえる。表面温度の実測値は計算結果よりやや低めに出ているが、これはスラブ表面のスケールの影響によるものではないかと考えられる。表面温度の低下は W. B. 領域、ローラ領域を通じてなめらかであり、一部のスプレー冷却法で見られるような激しい変化はない。Table 2 に計算に

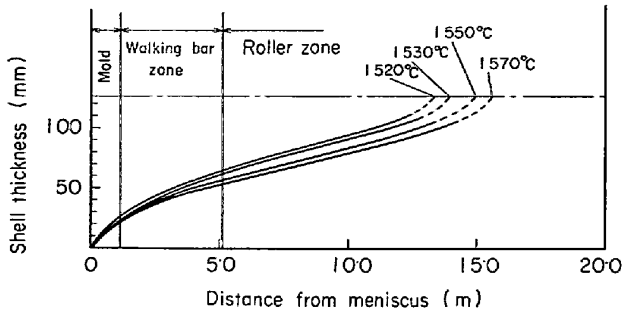


Fig. 8. Influence of casting temperature on solidification profile.

Slab size: 250×1900

Withdrawal speed: 0.5m/min

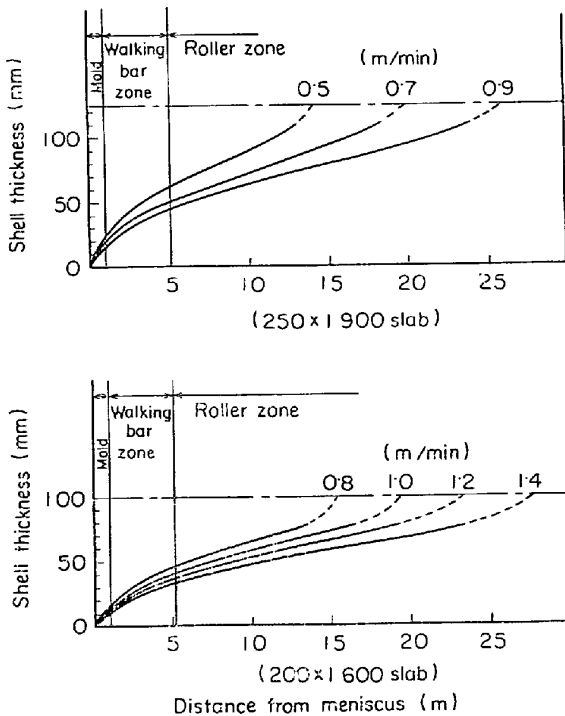


Fig. 9. Influence of withdrawal rate on solidification profile (Casting temperature: 1530°C).

使われたデータおよび計算結果より求められた各領域の平均熱伝達係数を示す。Table 2に示すごとく平均熱伝達係数の低下は徐々に起こっており、このためスラブ表面の温度降下がなめらかになっている。このことは凝固殻に大きな熱応力が発生するのを防ぎ、割れ発生の防止につながる。W. B. 領域の平均熱伝達係数が低いため、凝固殻平均強度はスプレー法に比べて小さいが、W. B. が外側から凝固殻を支持するためバルジングは起こらない。

Fig. 8に上記手法で得られたデータを用いて、鑄込温度を1520~1570°Cまで4段階変化させた場合の凝固

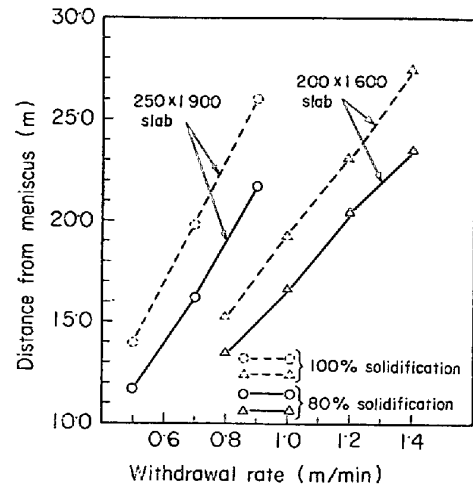


Fig. 10. Influence of withdrawal rate on 80% and 100% thickness of slab solidified point.

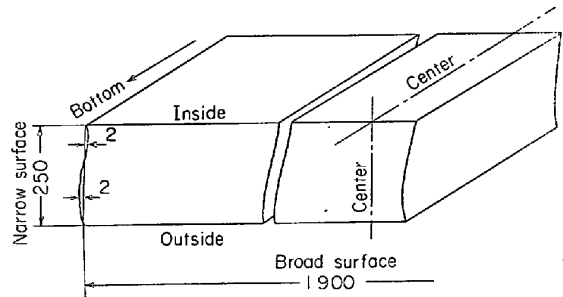


Fig. 11. Narrow side cross section of slab (250×1900).

殻厚さの変化を示す。図より明らかなごとく鑄込温度が高いほど、凝固殻厚さは薄くなっているが、最終凝固域に与える影響は3m以内でそれほど大きくはない。ただし、最終凝固部は引抜方向の物質あるいは熱移動が問題になるので破線で示した。

Fig. 9に前記条件で引抜速度と鑄型寸法を変えた場合の計算結果で、Fig. 10に以上の計算から求めた最終凝固位置および凝固殻厚さがスラブの1/2幅の80%に達する位置と引抜速度との関係を示す。図より明らかなごとく最終凝固位置およびスラブ1/2幅の80%の凝固殻厚さ達成位置と引抜速度との間には直線関係があることがわかる。

4. 鑄片の品質

上述のごとく当社加古川製鉄所に設置したW. B. 間接冷却方式曲型連続鑄造機はスラブ厚さを204~305mm、幅を900~2100mmのものが製造可能で、通常、254×1900mmおよび204×1600mmのものを鑄造している。

Table 3. Unit weight of slab (afterscarfing).

| | 200×1500 | 250×1900 |
|-----------|-----------|-----------|
| n | 45 | 55 |
| \bar{x} | 2592 kg/m | 3702 kg/m |
| σ | 13.2 kg/m | 15.5 kg/m |

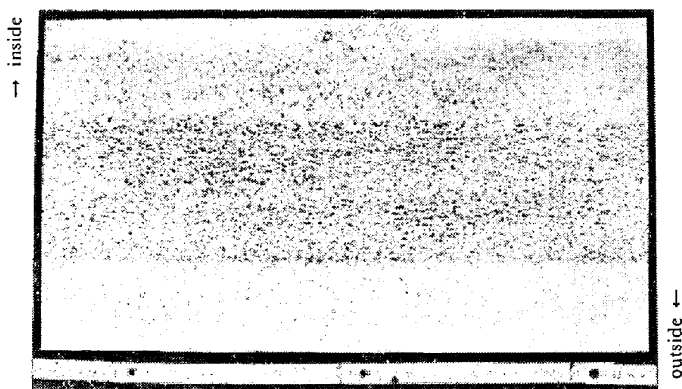


Photo. 1. Macro-structure of slab. (250×1900)

スラブ形状は鋳型が 1200 mm と長いこと、2次冷却帯上部では W. B. が凝固殻を面接触により支えていること、およびロール域のロールピッチが狭いことなどによりバルジングのきわめて少ない良好な鋳片が得られている。一例を挙げるとスラブ厚さ 250 mm の場合端部と中央部との差は平均 1.3 mm であった。

一般に曲型連続鋳造機のスラブではインサイドがアウトサイドに比べて短く、台形となるが本機の場合は Fig. 11 に図示するごとくインサイドはとくに短くはなく、狭面においてわずかに曲面を呈する。すなわち狭面のインサイド寄りでは凹型、アウトサイドでは凸型となり ±2 mm のゆるやかな曲面となつている。このようにスラブ形状が安定しているため鋳片単重のばらつきは Table 3 に示すごとく小さなものとなつている。

Photo. 1. は鋳造条件による 250 mm 厚スラブのマクロ組織を示すもので、取鍋での Ar バブリングを含む通常操業の鋳込条件では等軸晶域は常に厚さの 30% 以上を占め、中心偏析はほとんど認められない。また曲型連続鋳造機のインサイド 1/4 に発現しやすい巨大介在物については、前述の Ar バブリング法、最適吐出形状を持つ浸漬ノズルとフラックスの適切な選択によつて著しく減少し、鋳肌状況もよく 1 回のウォームスカーフで十分である。

5. ま と め

以上の諸結果をまとめると、

(1) W. B. (ウォーキングバー) 間接冷却方式連続鋳造機各部の凝固係数 K は以下のごとくである。

(i) 鋳型内 $K=29.8$ ($\text{mm min}^{-1/2}$)

(ii) W. B. 内 $K=23.9$ (")

(iii) ロール域 $K=21.9$ (")

(2) W. B. 接触時の熱伝達係数は略々 $360 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ でその内訳は

(i) 放射 $270 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$

(ii) ガス対流 $48 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$

(iii) 伝熱 $42 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$

(3) 鋳片形状は広面ではほとんどバルジングは認められず、狭面側に程度のゆるい凹凸があるが台形にはならず、単位スラブ重量当たりのばらつきは最大 0.5% と安定している。

(4) 鋳片表面性状はブローホール、ノロ噛み、タテ割れおよび横割れなどについて調査したが 1 回のウォームスカーフ (片面 2 mm) で問題なく除去されている。

(5) 鋳片内部性状は通常操業において約 30% の等軸晶域が得られ中心偏析もほとんどなく、巨大介在物も少ない。

6. 結 言

当社加古川製鉄所に設置した W. B. 間接冷却方式曲型連続鋳造機は 2 次冷却領域上部で間接冷却法による緩冷却を行ない、鋳片の凝固殻に熱負荷をかけることなく安定した状態で凝固を進行せしめ、次段の矯正領域へ移行し、熱的に安定した凝固殻を低歪速度で矯正することによつてローヘッドでありながらすぐれた品質の鋳片をすでに 30 万 t 余生産している。そこで本機の特徴を明らかにするため、硫黄添加法、高速鋳打込法およびコンピュータシミュレーションによつて、2 次冷却域 W. B. 領域の解析を行なつた。同領域の凝固係数 $K_{W.B}$ は $23.9 \text{ mm min}^{-1/2}$ であり、熱伝達係数は約 $320 \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ であった。この熱伝達係数の値はロールを用いた直接水冷の場合の 1/2 またはそれ以下と考えられ、後段に続く低歪矯正装置とあいまつて、すぐれた品質の鋳片が生産可能になると考えられる。

記 号

λ_A, λ_B : 気体の熱伝導度

λ_C : 鋼製ウォーキングバーの熱伝導度

α_A, α_B : スプレーの熱伝達係数

α_C : 空気の熱伝達係数

l : 空隙の幅

l_0 : 初期空隙幅

k : 空隙成長率

t_g : 空隙形成時間
 ω : 接触面積関数
 δ_{B1} : ウォーキングバーとスラブの表面粗さ
 δ_{B2} : ウォーキングバーとスラブの距離

$$\sigma_A = \frac{\sigma_0}{1/\epsilon_s + 1/\epsilon_M - 1}$$

$$\sigma_B = \frac{\sigma_0}{1/\epsilon_s + 1/\epsilon_{WB} - 1}$$

σ_0 : ステファンボルツマン定数
 ϵ_s : 鋼の放射率
 ϵ_M : 鋳型の放射率
 ϵ_{WB} : ウォーキングバーの放射率
 θ_s : スラブ表面温度
 θ_M : 鋳型壁温度
 θ_W : 水温
 θ_{WB} : ウォーキングバー表面温度
 C_S : 鋼の比熱
 C_M : 鋳型の比熱

G : 温度勾配
 R : 冷却速度
 V : 凝固速度

文 献

- 1) E. A. MIZIKAR: Iron and Steel Eng., June, (1970), p. 53
- 2) 大井, 松野, 中戸: 鉄と鋼, 58(1972) 11, p.120
- 3) A. W. D. HILLS: JISI, 203 (1965), p. 18
- 4) 千々岩: 日本機械学会 第 380 回講習会 (金属加工における熱的諸問題), p. 61
- 5) M. D. LEWIS: J. Inst. Met., 82(1953~54), p. 395
- 6) D. J. P. ADENIS, K. H. COATS, and D. V. RAGONE: J. Inst. Met., 91(1962~63), p. 395
- 7) E. A. MIZIKAR: Trans. AIME, 239(1967), p. 1747
- 8) 三塚: 鉄と鋼, 54(1968) 14, p. 1457
- 9) Physical Constant of some commercial steel at elevated temperature BISRA (1953)