

© 1988 ISIJ

水平連鑄法によるミニスラブの鑄造

技術報告

金子 英夫*・岡本 芳夫*²・山地 成一*³
水田 明能*³・神代 初義*・細見吉生*

Mini-slab Casting by Horizontal Continuous Caster

Hideo KANEKO, Yoshio OKAMOTO, Seiichi YAMAJI,
Akiyoshi MIZUTA, Hatsuyoshi KUMASHIRO and Yoshio HOSOMI

Synopsis :

Kawasaki-Technica type Horizontal Continuous Caster (COMPUTOCAST) was installed at Yachiyo Works of Kawasaki Heavy Industries, Ltd. in 1982, and various grades of steel has been cast in square and round billets. Recently, the caster equipped with new mold system for 40 mm×200 mm mini-slab has been in operation so as to establish thin slab casting technology.

This new equipment was developed to be applied to thinner and wider sections with new devices of 1) divided break rings 2) combined plate mold 3) adjustable mold plates. In order to optimize the above devices, the lengths of each part of mold were decided according to the simulation of solidification and the analysis of bulging. The casting of manganese steel (SMn443) with this new mold system has been carried out, which proved that the mini-slab with accurate dimensions and desirable quality was obtained with this system.

Furthermore, on the basis of the above technology, the equipments for 20 mm×200 mm section (stainless steel-SUS304) and cross-shape section (SMn443) were manufactured and it has also resulted in successful castings.

Key words : continuous casting ; castings ; ceramics ; crystal structure ; segregation ; solidification.

1. 緒 言

鋼の連続鑄造法は歩留りの高さ、省エネルギー効果、品質の均一性などのために急速に普及し、わが国の連鑄化比率は90%を超すに至っている。このような状況下で近年、連鑄機には設備の簡素化および作業性の改善が求められ、機高の低い連鑄機の開発が活発化している。なかでも究極的に低機高であり、従来の湾曲型連鑄機の欠点を解消する技術として注目される水平連鑄機についても、すでに何台かの実用機が稼動を始めている¹⁾。

川崎重工では、1982年に西独 Technica-Guss 社より水平連鑄の基本技術を導入、八千代工場にテスト用連鑄機（以下 COMPUTOCAST と称する）を設置し、(Photo. 1 および Table 1 参照) 設備および操業技術の改良・開発を進めており、製作実績も実用機を含めて3基をかぞえている。

一方、鉄鋼業界では省エネルギーの観点から、より最

終製品に近い薄物を鑄造することにより圧延時の工程を省略しようという試みが行われている。すなわち、鑄片厚さを50 mm程度以下にして、粗圧延を不要にするものであり、ロータリー式、ベルト式あるいはロール式などの連鑄機が開発されつつある²⁾。

筆者らは、水平連鑄機を薄物の鑄造に適用する可能性をさぐるため、40 mm厚×200 mm幅断面などミニスラ

Table 1. Specification of COMPUTOCAST.

Ladle capacity	5 t
Tundish capacity	3 t, 1.5 t (with heater)
Number of strands	1
Casting size (Section)	120 mm square, 20-96 mm round 40 mm×200 mm, 20 mm×200 mm, etc.
Steel grades	SUS304, SCH22, SKD11, SKH51, SCMnH2, SMn433, SMn443, SCM435, SM41, S25C-S55C, High-Cr steel, etc.
Casting speed	Max. 4.0 m/min
Mold	Water cooled copper with carbon liner
Secondary cooling	Air cooling
Withdrawal device	DC motor drive
Electro-magnetic stirrer	M-stirrer (for mold zone) S-stirrer (for secondary cooling zone)
Equipment dimension	
Overall length	32 000 mm
Pass line	1 100 mm+F. L.

昭和60年10月本会講演大会にて発表 昭和61年12月1日受付 (Received Dec. 1, 1986)

* 川崎重工業(株)神戸工場 (Kobe Works, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 3-1-1 Higashikawasaki-cho Chuo-ku Kobe 650-91)

*² 川崎重工業(株)八千代工場 (Yachiyo Works, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

*³ 川崎重工業(株)技術研究所 (Technical Institute, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

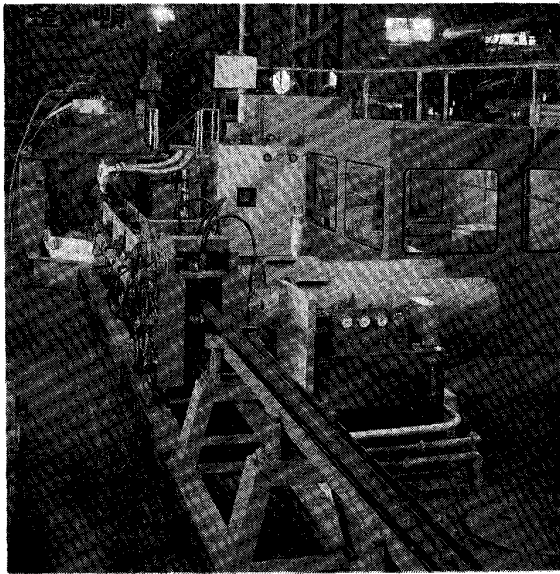


Photo 1. General view of COMPUTOCAST.

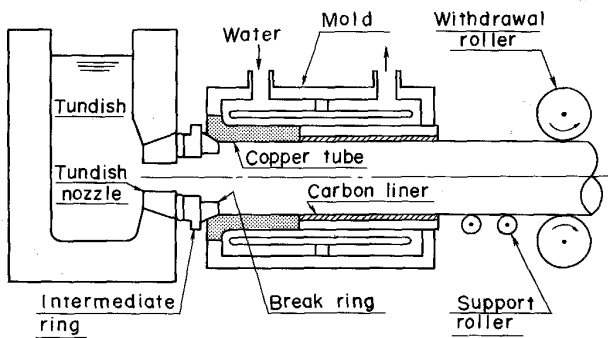


Fig. 1. Schematic diagram of COMPUTOCAST.

ブ用の設備を開発し、COMPUTOCASTにより鋳造を行った³⁾。水平連鋳機については内外からすでに多くの報告がなされているが、薄肉あるいは広幅の断面をもつ鋼材の鋳造例は見あたらず、本機の適用性には不明の部分が多かつた。本報告ではCOMPUTOCASTによるミニスラブの鋳造に関し、設備開発および鋳造試験結果などについて述べる。

2. 鋳造上の技術課題

2.1 構造と従来の開発経緯

COMPUTOCASTの主要部分の構造断面図をFig. 1に示す。タンディッシュ内に注がれた溶鋼はモールド内で凝固し、引抜装置により水平方向に引き抜かれる。

図のように本機はパスラインが水平一直線であることから、機高が低く溶鋼静圧も小さいため、鋳片支持機構、曲げ矯正装置などがシンプルまたは不要であり、設備費およびメンテナンスが大幅に軽減される。また、鋳片を

曲げる必要がないので割れ感受性の高い鋼種も鋳造できる、モールドがタンディッシュに直結されているので鋳片の清浄性がすぐれる、モールドにおける湯面管理作業が不要であるなどの利点を有している⁴⁾。

個々の構成部分には以下の特徴がある。

タンディッシュとモールドとの間には、中間リング、ブレイクリングなどの接続耐火物を用い、これにより溶鋼は完全にシールされる。このうちモールドの入口部に挿入されるブレイクリングは、溶鋼に凝固開始点を与える機能をも有し、鋳造の安定性を支配する重要な部品である⁵⁾。

モールドは水冷した銅合金部分とその内面にグラファイト質カーボンライナーを内張りした部分とからなる⁶⁾。このカーボンライナーによりモールドは自己潤滑性を有しており、潤滑剤を不要としている。カーボンライナーをやや長めに設けているため、スプレー水による二次冷却は行っていない。

また凝固シユルの成長を確実にするために、従来型(垂直型または湾曲型)連鋳機ではモールドを振動させているが、本機では引抜装置により鋳片に間欠運動を与えながら引き抜いている。この引抜装置はマイクロプロセッサにより制御されており、速度、振動数などの引抜条件は鋳造状況に応じて常に最適値に設定される⁷⁾。

筆者らは八千代工場に本機を設置した後、120 mm 角断面および $\phi 20 \sim \phi 96$ mm 丸断面ビレットの製造に関して、つぎのような開発を行い、より高品質な鋳片を得るに必要な技術を蓄積した^{8)~11)}。

(1) タンディッシュに高周波誘導式ヒーターを導入し、溶鋼温度をコントロールすることにより生産性の向上と低温鋳造による品質向上を実現した。

(2) モールド部および二次冷却帯(空冷部)にロータリーおよびリニアタイプの電磁攪拌装置を設置し、鋳片の凝固組織の微細化を可能にした。

(3) 水平連鋳機では一般に前述の間欠引抜きにともない、鋳片表面に特有の表面欠陥(ウィットネスマーク)¹²⁾が発生するが、モールド入口部を高温に保持する手法により、この欠陥の深さを大幅に低減させ、品質上の問題を解消した。

2.2 ミニスラブ鋳造上の技術課題

COMPUTOCASTにはさらにつぎのような特長があるため、薄肉・広幅断面の鋳造にも適用性があると考えられる。

(1) 従来型連鋳機と比較して、タンディッシュ・モールド間の耐火物ノズルの径が大きいいため、ノズル詰まりが発生しにくい。

(2) モールド入口部に作用するタンディッシュ内の溶鋼静圧は従来型連鑄機の場合よりも大きく、初期凝固シェルがモールドに密着するため、均一な凝固が進行する。

(3) 凝固中に溶鋼静圧が増大しないため、バルジングが発生しにくい。

しかし、一般に鑄片サイズとしては粗圧延を省略するために厚さ 10~50 mm、最終製品の需要量から幅 1000~2000 mm が望ましく、この程度の断面の鑄造を行うには、これまでに蓄積した角形・丸形ピレット用の技術とは異なる開発が必要と考えられる。すなわち、以下のような課題が予想される。

(1) 断面幅が拡大することによりバルジングが発生しやすくなり、それにとまなう割れ、偏析の生じる恐れもある。

(2) モールド内面と鑄片表面の接触が不均一になることにより、冷却が一樣でなくなり、したがって凝固組織の不均一、ブリッジングによる引け巣、偏析、さらには鑄片の変形や割れなどの発生も予想される。

(3) ノズル内径は、モールド内径すなわち鑄片寸法より小さいため、鑄片が薄肉になるにつれ必然的にノズルが小さくなり詰まりやすくなる。

(4) 生産量の少ない特殊鋼を鑄造する場合を除いて、一般的には従来の大断面鑄造機と同等の生産性が要求されるため、10 m/min 以上の高速度鑄造が必要となる。

(5) 設備構成部品の製作上の問題として、薄肉・広幅断面用のモールドおよびブレイクリングなどの成形または加工が難しくなる。

3. 設備開発

薄肉・広幅断面の鑄造設備は、上記の課題に対する本機の基礎的な適用性を調査することを目的として、まず 40 mm 厚断面のミニスラブを対象として開発した。鑄造試験は既設設備のうちタンディッシュ、支持ローラーテーブル、引抜装置および搬送装置などの鑄造ラインを流用して行うため、これらの幅制限により鑄造断面幅を 200 mm としたが、上記の目的を考慮して、より広幅断面にも適用できる設備構造とした。以下、本ミニスラブ用の設備開発について述べる。

3.1 ブレイクリングおよびモールド

ブレイクリングは、耐熱性、機械加工性などを考慮して窒化ほう素 (BN) のホットプレス成形品を用いているが¹³⁾、成形時の寸法上の制約により長寸法のもの成形が困難である。そこで Fig. 2(a) に示すように分割し、組み合わせてモールドへ挿入する構造として広幅断

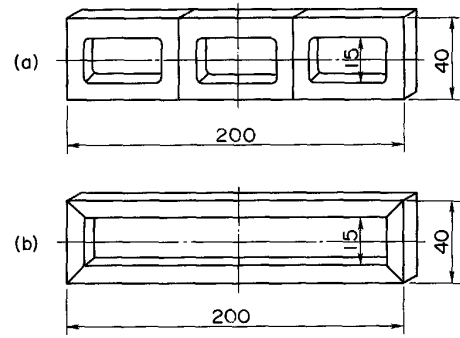


Fig. 2. Divided breaking for mini-slab.

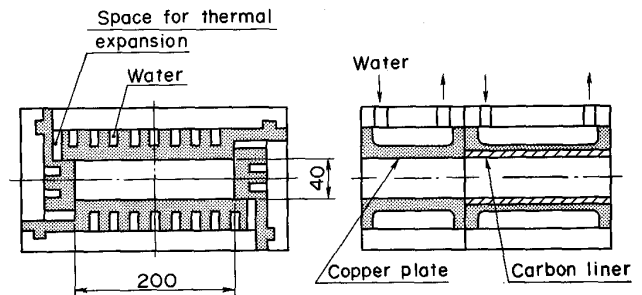


Fig. 3. Combined plate mold for mini-slab.

面への適用を可能にした。なお、一体式のブレイクリングおよび機械加工時の歩留りの高い、Fig. 2(b) に示す分割式ブレイクリングも、本寸法なら製作が可能のため、比較のために使用した。

水平連鑄用モールドは一般にはチューブラ型の一体式で製作するが、鑄造断面が薄くなると加工が困難になり、しかも内面の摩耗部を再生することができないため多大なコストが発生する。したがってプレート型の組合せモールドを採用し、Fig. 3 の構造を考案した。BN の熱膨張率はきわめて小さいため、鑄造中はモールドの熱膨張によりブレイクリングとモールドとの間にすきまが発生せぬよう注意する必要がある。Fig. 3 のモールドは、これを避けるため、内寸法の変化を極力小さくするように構成している。この構造はモールド入口部からカーボンライナー部にまで適用した。

そのほか、タンディッシュとモールドとの接続耐火物である中間リング、タンディッシュノズルについては、成形・加工性、耐熱性および溶鋼の流入性を考慮して Fig. 4 のような形状とした。

3.2 アジャスタブルモールドプレート

COMPUTOCAST におけるモールド出口付近の鑄片支持機構としては、案内用のロールが鑄片下面に約 1 m ピッチで設置されるのみであるが、広幅断面の鑄造を行う場合にはモールド出口でのバルジング防止に考慮する

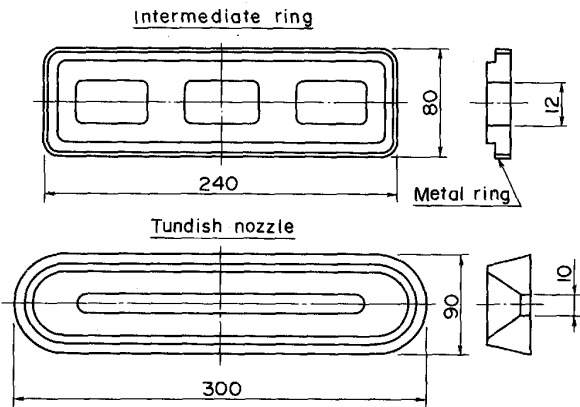


Fig. 4. Connecting refractories for mini-slab.

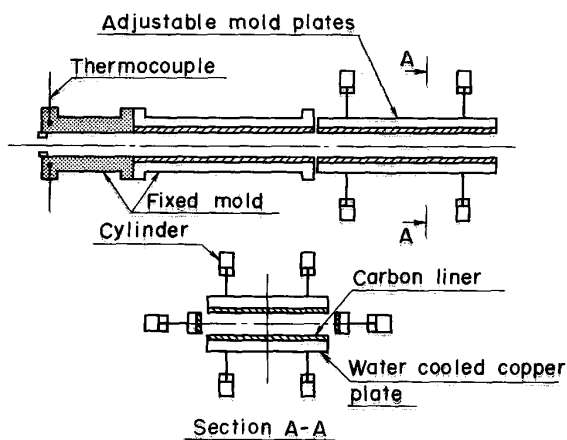


Fig. 5. Mold and adjustable mold plates for mini-slab.

必要がある。この点、従来型連铸機ではモールド直下に短ピッチで铸片支持ロールを設け、スプレー水による二次冷却を行っているが、この方法を用いればロールアライメントなどの整備負荷とスプレー水処理のための設備費用が増大する。そこでこれに代わるバルジング防止法として、以下に示すアジャスタブルモールドプレートを採用した。

本プレートは Fig. 5 に示すようにカーボンライナーを内張りした水冷プレートで、モールドの出口に設置しシリンダーにより铸片表面に押し付けられるよう構成される。押し付け圧力が高すぎると铸片の引抜き駆動に悪影響がおよぶが、適正な圧力で押し付けることによりバルジングが防止される。さらに長辺側プレートを数分割すれば、铸片表面との接触が良くなり、均一冷却による内部品質の向上も期待できる。

4. 凝固シミュレーションおよびバルジング解析

計算機による COMPUTOCAST の凝固シミュレ

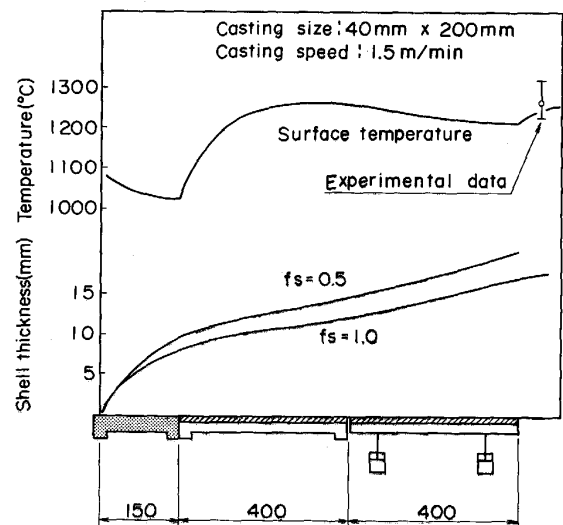


Fig. 6. Analyzed shell thickness and surface temperature.

シオンは、铸造鋼種、引抜き速度などに対応する冷却能力の評価を可能にし、表面性状および内部品質の改善のための基礎データをもたらすことができる。ミニスラブ用のモールド設計においては、アジャスタブルモールドプレートを含む冷却部の長さを、バルジングによる変形と割れを考慮に入れて決定した。以下ではこの場合に実施した凝固シミュレーション¹⁴⁾とバルジング解析の例を示す。

4.1 凝固シミュレーション

Fig. 5 の軸直角断面がモールドの出口方向に移動する系とし、熱の移動は平面非定常問題としてモールド内の凝固殻の成長をシミュレートする。モールド外面の冷却による熱伝導・凝固解析に、溶鋼静圧および接触弾塑性を考慮した熱収縮解析を連成して行うが、溶鋼の凝固潜熱の放出など物性の温度依存性なども考慮する。モールド内面と铸片表面との接触部については、銅モールドおよびカーボンライナー付きモールドからなる固定モールド部では上記の連成解析によるエアギャップ量を与え、アジャスタブルモールドプレート部では接触部の表面粗さおよびプレートの押し付け力などから決まる等価な接触熱抵抗¹⁵⁾を与えた。

本シミュレーションにより求めたモールド内の凝固殻および铸片表面温度の分布について、一例を Fig. 6 に示す。

4.2 バルジング解析

バルジング解析は Fig. 7 に示す有限要素モデルにアジャスタブルモールドプレート出口部での凝固殻厚さおよび温度分布を与え、溶鋼静圧を负荷した弾塑性応力解

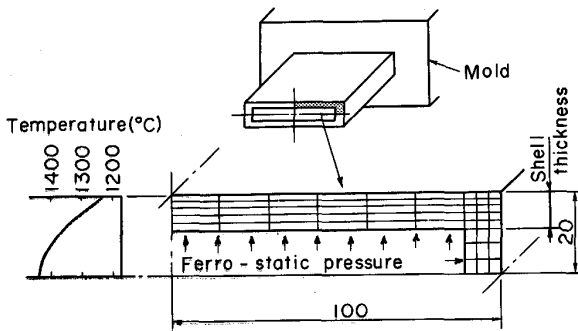


Fig. 7. Element division for bulging analysis.

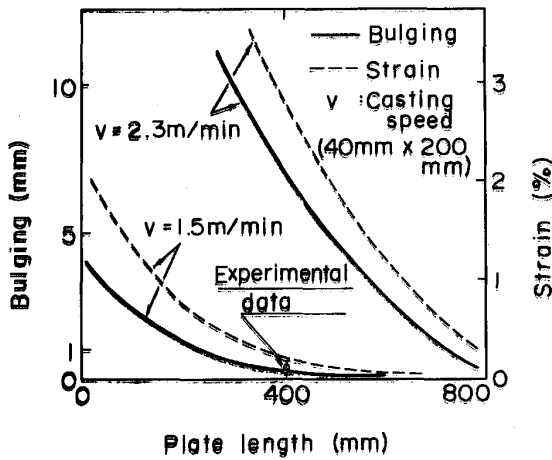


Fig. 8. Relation among bulging deflection, internal strain and length of adjustable mold plate.

析として実施する。鋳片の物性データとして材料の温度依存性を考慮した応力-歪み関係を与えて解析し、長辺中央部の変位（ふくらみ量）と、内部割れ発生の判定条件となる最大内部歪みを求める。銅モールドおよびカーボンライナー付きモールドの長さをそれぞれ 150 mm および 400 mm とし、アジャスタブルモールドプレートの長さとして凝固シミュレーション・バルジング解析を行った例を Fig. 8 に示す。これより、鋳造速度に応じてアジャスタブルモールドプレートの長さを選べば、バルジング量および内部割れを抑制できることなどが明らかとなった。

5. 鋳造試験結果

5.1 操業状況

以上の開発と検討にもとづき、40 mm 厚×200 mm 幅断面ミニスラブの鋳造試験をマンガン鋼 SMn 443 にて行った。その主な操業条件と実施状況を Table 2 および Photo. 2 に示す。

本ミニスラブとほぼ同じ断面積を有する φ96 mm 丸断面の場合に比べて、鋳造初期にノズル詰まりを発生し

Table 2. Casting conditions for mini-slab.

Slab size	40 mm×200 mm
Steel grade	SMn443
Casting speed	1.2-1.5 m/min
Oscillation cycle	80-100 cpm
Oscillation stroke	12-18 mm
Molten steel temperature	1540-1560°C
Break ring	BN (Divided ring)
Mold	Plate type with adjustable mold plates

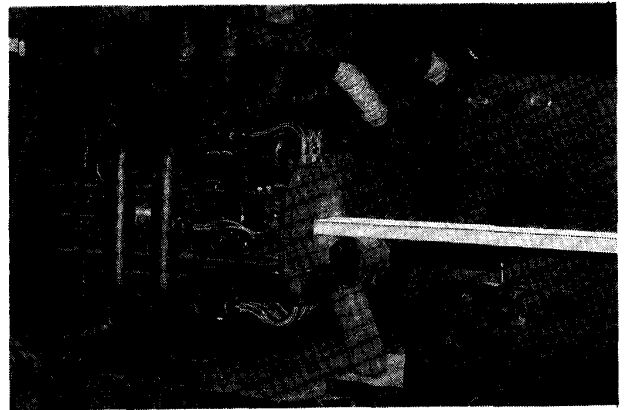


Photo. 2. Aspect of mini-slab casting.

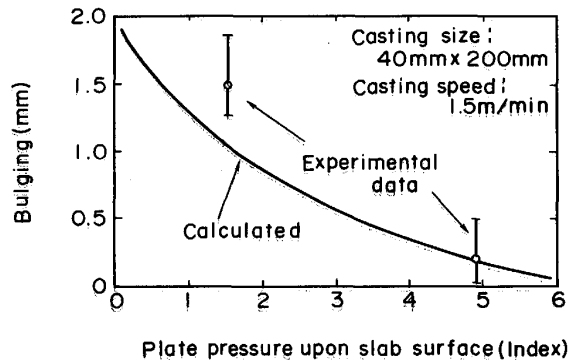


Fig. 9. Relation between bulging deflection and pressure of adjustable mold plates.

やすい傾向があつたが、溶鋼の過熱度を適正にとりヒーター付きタンディッシュによりこれを保持すればノズル詰まりは発生せず、タンディッシュ内に注湯した全溶鋼（最大 2.5 t）を鋳造することができた。

分割式ブレイクリングのうち Fig. 2(a) に示すタイプのものを使用した場合には、一体式ブレイクリングの場合と同様に円滑な鋳造ができ、かつ寿命の面でも劣ることがなかつた。一方 Fig. 2(b) のブレイクリングでは、リングとモールドとの接触部に溶鋼が差し込み、凝固シェルの生成が乱れる場合があつた。これにより、広幅断面の鋳造に関しては Fig. 2(a) に示すブレイクリングが適用できることが確認された。

組合せモールドについては、操業上のトラブルは全くなく、組合せ面への溶鋼の差し込み、ブレイクリングの

脱落またはズレなども発生しなかった。

アジャスタブルモールドプレートは長さ400mmで、Fig. 5のとおり4辺とも各1枚のプレートで構成した。Fig. 8およびFig. 9に示すように、本プレートに適正な押し付け圧力を与えることにより鑄片のバルジングは防止できたが、圧力を下げるとバルジングが生じ、鑄片内部に割れ(Photo. 6参照)をともなう場合も多かった。

COMPUTOCASTでは鑄造中はモールド入口部の温度とモールド出口での鑄片表面温度を検知し、引抜装置にフィードバックすることにより引抜条件を制御している。たとえばモールド内でシェルが正常に形成されず、ブレイキング付近にとり残された場合には、モールド入口部の温度が急激に低下し、その結果ただちに引抜条件が変更される。本鑄造試験では、モールド入口部の温度はFig. 5に示す2個所で、鑄片表面温度はモールド出口付近の長辺中央にてそれぞれ検出した。鑄造時の温度変化の一例をFig. 10に示す。開始直後には若干不安定な時期があるが、約10min経過後からは円滑な鑄造の行われたことがわかる。また鑄片表面温度の実測値はFig. 6で求めた計算値とほぼ一致している。

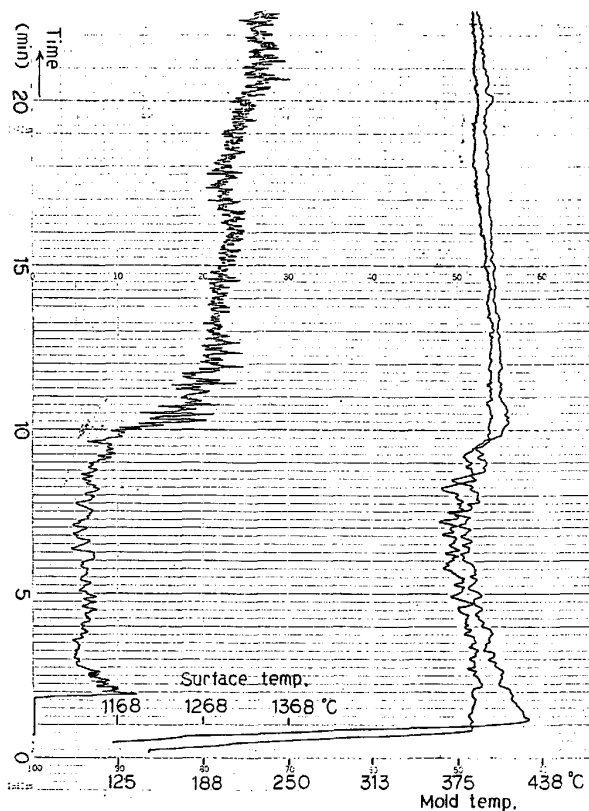


Fig. 10. Temperature of mold and mini-slab surface.

5.2 鑄片品質

鑄造試験により得られた40mm×200mm断面のミニスラブの外観をPhoto. 3に示す。鑄片表面には間欠引抜きによるウィットネスマークが見られるが、表面付近のマイクロ組織調査(Photo. 4参照)によれば、マーク組織は浅く、割れをともなっていないことが確認される。

Photo. 5(a), (b)は鑄片の縦・横断面マクロ組織であるが、全体に微細な柱状晶が見られ、最終凝固位置が鑄片の中心と一致していることから、上下面より均等に冷却されたことが推定される。またFig. 11に発光分光分析による成分調査結果を示すが、本鑄片には大きな偏析も生じていないことがわかる。

一方、Photo. 6はアジャスタブルモールドプレートの押し付け圧力を減らした場合の鑄片で、バルジングによる変形、短片付近での内部割れおよび中心部のポロシティなどが観察される。

以上の結果より、新たに採用したブレイキング、モー

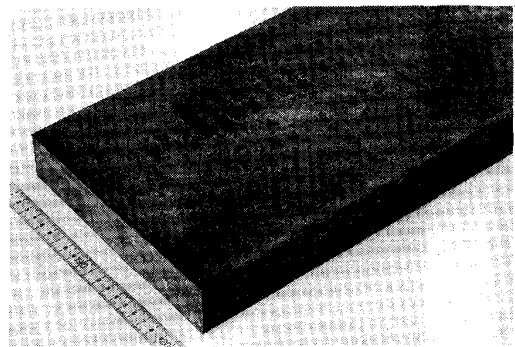


Photo. 3. Appearance of 40 mm × 200 mm mini-slab.

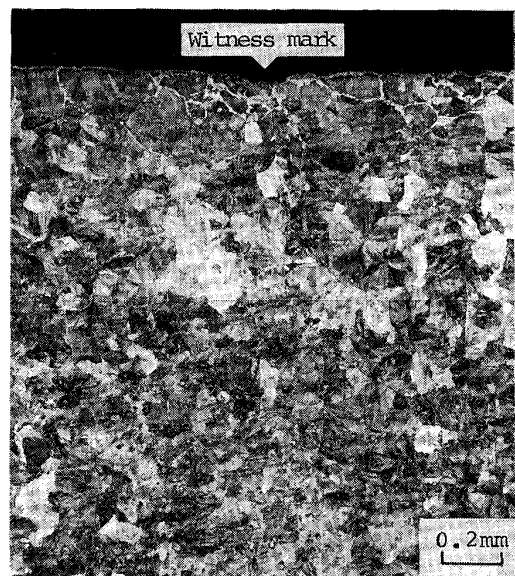
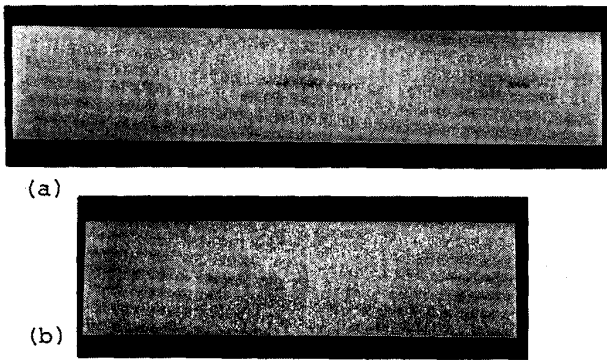


Photo. 4. Microstructure of witness mark.



(a) Cross-section (b) Longitudinal-section
Photo. 5. Macrostructure of mini-slab (40 mm × 200 mm).

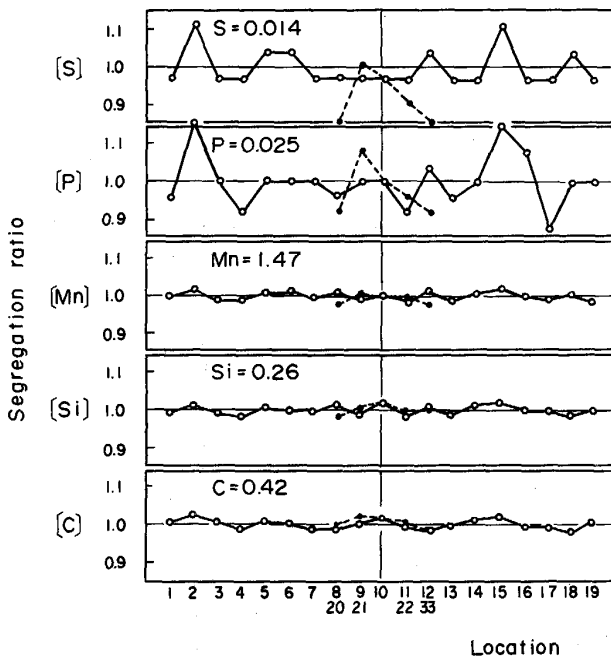
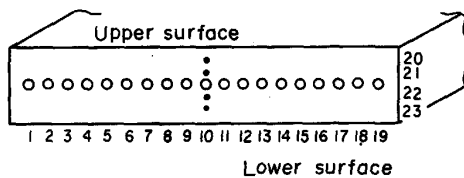


Fig. 11. Segregation ratio of mini-slab.

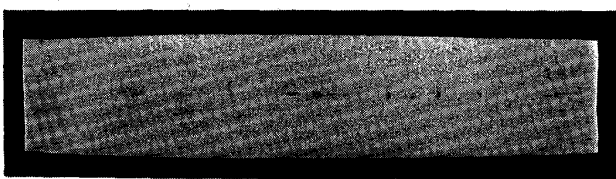


Photo. 6. Macrostructure of bulged mini-slab (40 mm × 200 mm).

ルドおよびアジャスタブルモールドプレートが、本サイズのミニスラブ鑄造に対して有効に機能したと考えることができる。

6. 異種断面への応用

以上に述べた 40 mm × 200 mm 断面のミニスラブにおける鑄造成果をふまえ、より薄肉断面および特殊断面の鑄造可能性を調べるため、20 mm 厚 × 200 mm 幅断面および最薄部厚さ 19 mm の十字形断面の鑄造を実施した。

いずれもモールド長さは前述のような凝固・バルジング解析を経て決定し、長さ 400 mm のアジャスタブルモールドプレートを設置した。さらに鑄片の均一冷却を促進するために、同プレートは長辺側を断面周方向に分割し、20 mm × 200 mm 用には合計 10 要素、十字形用には 14 要素により構成した。その他、モールドおよびブレードリングについても、加工性を考慮して分割・組合せ式とするなど、40 mm × 200 mm ミニスラブに用いた技術を応用した。

鑄造テストは、同じく既設 COMPUTOCAST を使用し、20 mm × 200 mm はステンレス鋼 SUS 304、十字形はマンガン鋼 SMn 443 にて実施した。鑄造速度はそれぞれ 1.0 ~ 2.0 m/min, 0.8 ~ 1.4 m/min とした。

鑄片の外観および横断面マクロ組織を Photo. 7, Photo. 8 および Photo. 9 に示す。いずれの断面においても微細な柱状晶が表面より発達し先端が各部板厚のほ

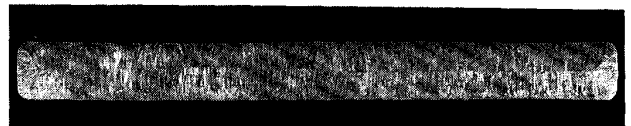


Photo. 7. Macrostructure of 20 mm × 200 mm mini-slab.

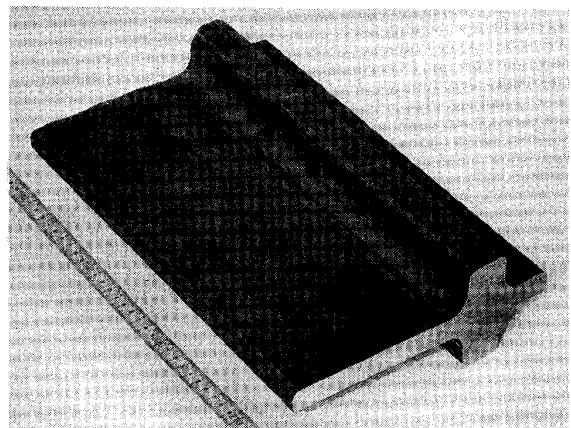


Photo. 8. Appearance of cross-shape slab.

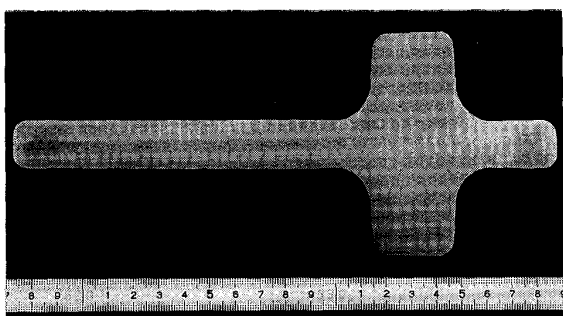


Photo. 9. Macrostructure of cross-shape section.

は中央に達しており、外形形状も正確であるため、本モールド構造がこれらの断面形状にも適用可能であることが確認された。なお、ステンレス鋼である 20 mm×200 mm 断面の鑄片では、そのマイクロ組織のデンドライト二次アーム間隔が 15~20 μm (表面付近)、20~30 μm (中央部) であることより、冷却速度は 2~10°C/s 程度であると推定される。

7. 結 言

テスト用水平連鑄機 COMPUTOCAST を用い、40 mm 厚×200 mm 幅断面のミニスラブに関する設備開発および鑄造試験を実施した。設備にはより薄肉・広幅断面への対応も考慮して、

- (1) 分割式ブレードリング
- (2) プレート型組合せモールド
- (3) アジャスタブルモールドプレート

を採用し、モールド各部の長さは凝固シミュレーションおよびバルジング解析により設定した。鑄造試験はマンガン鋼により実施したが、適正な条件下では円滑な鑄造ができ、形状、内部組織ともにすぐれた鑄片を得た。

さらに本技術を応用し、ステンレス鋼による 20 mm

厚×200 mm 幅断面およびマンガン鋼による特殊十字形断面の鑄造を試みた。鑄片の内部組織はほぼ対称で、断面形状も正確であることから、採用したモールド構造のもつ均一な冷却能力が確認された。

本プロセスによる水平連鑄機を実用機として薄板生産ラインに適用するためには、より広幅断面の鑄造および鑄造の高速化が必要であり、今後の重要な課題である。しかしながら、実施した一連の試験により、本プロセスが薄肉・広幅鑄片または特殊断面、たとえばビームブランクなどの鑄造に対して、基本的には十分に適用可能であると考えることができる。

文 献

- 1) 野崎 努, 糸山誓司: 鉄と鋼, **71** (1985), p. 784
- 2) 大橋徹郎: 日本金属学会会報, **25** (1986), p. 505
- 3) 宮坂知夫, 岡本芳夫, 水野 充, 金子英夫, 神代初義, 清輔泰三: 鉄と鋼, **71** (1985), S1051
- 4) 金子英夫: 川崎重工技報, **86** (1984), p. 106
- 5) 本田 旭, 宮本 明, 山田武海, 伊藤雅治, 安斎孝儀, 広瀬 猛: 日本鋼管技報, **93** (1982), p. 124
- 6) H. A. KRALL and H. HUBER: Stahl Eisen, **103** (1983), p. 1059
- 7) H. A. KRALL and H. HUBER: MPT-Metallurgical Plant and Technology (1983) May, p. 44
- 8) 岡本芳夫, 水野 充, 山田重治, 金子英夫, 神代初義, 細見吉生: 鉄と鋼, **71** (1985), S274
- 9) 蔦 紀夫, 山地成一, 藤田博之, 金子英夫, 神代初義, 細見吉生: 鉄と鋼, **71** (1985), S275
- 10) 水田明能, 堺 邦益, 岩田 章, 中村弘道, 稲岡善行, 守田明彦: 鉄と鋼, **71** (1985), S276
- 11) 蔦 紀夫, 山地成一, 岩田 章, 水田明能, 岡本芳夫, 稲岡善行, 金子英夫, 神代初義, 細見吉生: 川崎重工技報, **92** (1986), p. 8
- 12) H. A. KRALL: Proc. Int. Conf. Cast. (1982), p. E3.1
- 13) 木村智明: 第 69・70 回西山記念技術講座 (日本鉄鋼協会編) (1980), p. 351
- 14) 蔦 紀夫, 山地成一, 藤田博之, 金子英夫, 神代初義, 細見吉生: 第 8 回 NCP 研究会・懇話会シンポジウム論文集 (1985), p. 183
- 15) 日本機械学会, 伝熱工学資料 (1966)