

## 技術報告

UDC 621.746.047 : 669.14-147-423.1

## ビームブランク鑄片の連続鑄造

大森 尚\*・上田 徹雄\*・溝田 久和\*  
八百 升\*・新庄 豊\*<sup>2</sup>・藤村 俊生\*

## Continuous Casting of Beam Blanks

Hisashi ŌMORI, Tetsuo UEDA, Hisakazu MIZOTA,  
Minoru YAO, Yutaka SHINJO, and Toshio FUJIMURA

## Synopsis :

No. 3 continuous casting machine at No. 1 steel-making shop in Mizushima Works of Kawasaki Steel Corp. has capability of casting both large section blooms (300×400 mm, 400×560 mm) and beam blanks. It has been successfully operated since October, 1973. In continuous casting of beam blanks, various kinds of defects are liable to occur because of its complicated section. However, the adoption of suitable operating condition such as mold powder selection, cooling condition, and complete maintenance of machine have made it possible to roll almost all cast blanks without any surface conditioning. Casting speed has also been increased with good quality by preventing flange deformation of cast blanks.

## 1. 緒 言

連続鑄造の使命は出来るだけ製品に近い形状の鑄片を鑄造することであり、ビームブランクの連続鑄造は、この使命を忠実に実行しうるものの一つであろう。近年ビームブランクの連続鑄造機はしだいに増加し、さらに建設される気運にある<sup>1)</sup>。水島製鉄所の第3連鑄機はアルゴマ社のそれを基本として設置された日本最初のビームブランク連続鑄造機であり主な特徴は

- 1) 単一サイズ連鑄素材から多サイズ圧延をねらいとした。
- 2) 芯出しや、ブレイクアウト復旧の容易なることを目的として、モールド、ローラーエプロンを一括交換方式とした。
- 3) 表面品質改善を目的としてパウダー鑄込みを採用したことである。

アルゴマ社の連続鑄造機と比較して、より安定な操業と品質をねらいとした連続鑄造機といえる。

以下に本連続鑄造機の操業と品質の改善について、これまで得られた知見を総括する。

## 2. ビームブランクの連続鑄造設備

ビームブランクの連鑄は、その鑄造断面が複雑な形状をしているために、設備上特別な配慮を必要とする。Fig. 1 に水島製鉄所の第3連鑄機に採用したビームブランクの形状を示した。ビームブランクの鑄造においては、180 t の溶鋼を 60 min 以内に鑄造完了しようとする場合 0.9 m/min の鑄造速度が必要である。完全凝固まで鑄片の支持拘束を行うとすると、その必要長さは約 8 m となり、メニスカスから約 8 m の間をビームブランクに専用のローラーエプロンとした。ビームブランク用モールドは Fig. 2 に示したようにフランジ中央部に

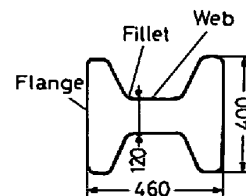


Fig. 1. Cross section of continuously cast beam blank in Mizushima.

昭和 55 年 11 月 4 日受付 (Received Nov. 4, 1980)

\* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Mizushima kawasakidori Kurashiki 712)

\*<sup>2</sup> 川崎製鉄(株)技術研究所 水島研究室 (Mizushima Laboratory, Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

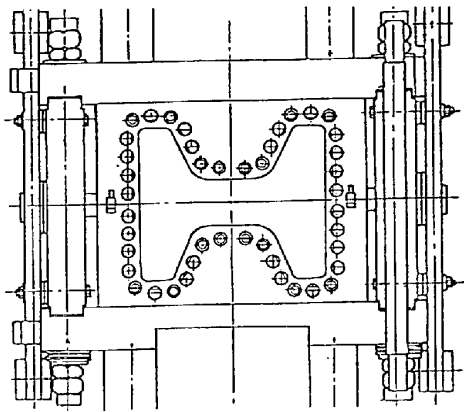


Fig. 2. Schematic drawing of the mold for beam blank.

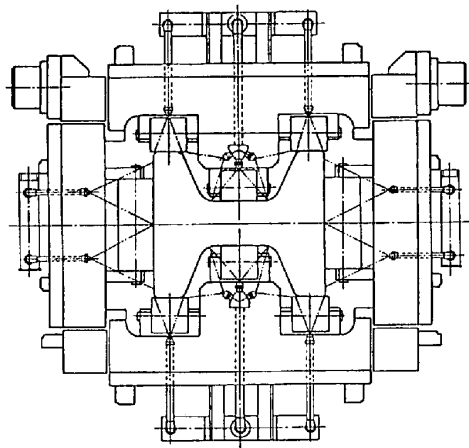


Fig. 3. Cross-section of roller apron.

接合点を有する 2 分割のブロックモールドである。モールドキャビティの周囲には冷却水用のキリ穴を配置し、その中に挿入する仕切り棒により流量配分を調整する構造となつている。Fig. 3 にビームブランクの No. 1 セグメントの鋳片支持ローラ、および冷却スプレーノズルの配置を示した。No. 1 から No. 3 セグメントはビームブランクの専用のセグメントであるが、No. 4 以後のセグメントはブルームと共用になつている。モールドサイズを変更する場合、モールド以降 No. 3 セグメントまでのローラーエプロンは全て取替える必要がある。モールド、オッションションガイド、No. 1 および No. 2 のセグメントを一体のフレームに組み込んで、この一体フレームと No. 3 セグメントを天井クレーンの主巻と補巻を使用して同時に交換する一括取替方式を採用している。

鋳片にスプレーされた冷却水の一部はビームブランクの R 内側のウェブ部を流下するので、これを水切装置によりページする必要がある<sup>1)2)</sup>。

また、本機は大断面ブルーム (最大 400×560 mm) とビームブランクの兼用機であり、大断面ブルームで高速鋳造を行う必要から、ピンチロールはマルチタイプとし、2 点矯正を採用した。さらにメニスカスよりトーチカッターまでの距離は 41.6 m と長くした。

### 3. ビームブランク鋳片の品質と操業

#### 3-1 鋳造仕様

代表的鋼種である JIS 40 キロ鋼の鋳造においては、通常取鍋～タンディッシュ間、タンディッシュ～モールド間は大気鋳造である。当初モールド潤滑としては、レープシードオイルを使用していたが、鋳片表面品質に対する要求がより高度なものとなり、モールドパウダーを採用するに至つた。パウダーの鋳片内混入を防止する目的でパウダー部にのみ浸漬ノズル (セミイマージョンノズル) を採用している。

一般構造用鋼では、非金属介佐物による製品欠陥の問題は少ないが、より高級な JIS 50 キロ以上などでは、介在物対策として、取鍋～モールド間の大気の遮断 (無酸化鋳造) やイマージョンノズル材質の選定など非金属介在物対策が必要である。

#### 3-2 凝固の特徴

##### 3-2-1 凝固状況

ビームブランク鋳片の凝固をブレイクアウト鋳片のシェル厚調査および、直接差分法による 2 次元伝熱計算法によつて検討した。

##### 1) ブレイクアウト鋳片による調査<sup>3)</sup>

Table 1 に示した鋳造条件でブレイクアウトした鋳片の凝固シェル厚を実測し、各部における凝固係数を求めた。結果を Table 2 に整理して示した。これらの結果から推定される凝固形態は Algoma 社の報告とはほぼ一致しており、例えば鋳型内におけるウェブ部の凝固をメニ

Table 1. Casting conditions of break out shell.

Steel grade	SS 41	
Composition (%)	C/0.19, Si/0.22, Mn/0.06, P/0.013, S/0.033	
Steel temperature in tundish (°C)	1 550	
Nozzle diameter (mmφ)	19	
Casting speed (m/min)	0.85	
Cooling rate (1/min)	Mold 1 700	Mold spray 110

Table 2. Solidification factor or beamblank.

part	factor	mold		Secondary cooling zone	
		K	b	K	b
center of flange		16.4	0.8	25.0	-5.6
fillet		14.8	2.8	23.8	-3.5
web	inner radius	20.0	1.2	26.6	-3.3
	outer radius	17.2	1.3	28.4	-6.4
	average	17.8	1.9	27.5	-4.8

$D = K\sqrt{t} + b$  (mm  $\sqrt{\text{min}}$ )  
 K ; solidification factor  
 b ; constant

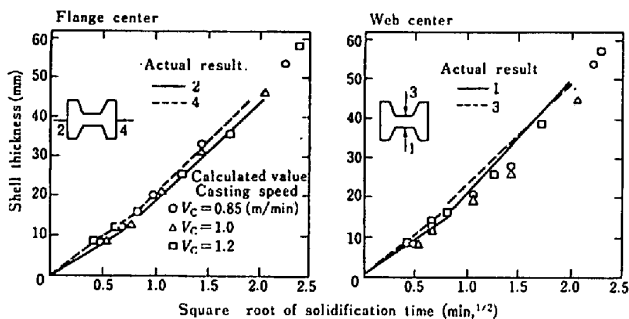


Fig. 4. Comparison of shell thickness between calculated value and actual result.

$V_c = 1.0 \text{ m/min}$ .

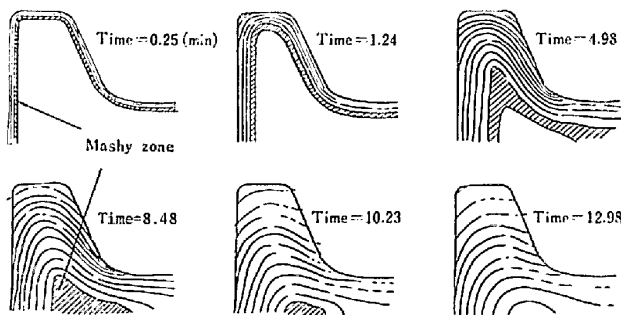


Fig. 5. Progress of solidification of C. C. beam blank by calculation.

スカス下 0.6 m のシェル厚で比較するといずれも 16.9 mm となった。

2) 直接差分法による2次元伝熱計算<sup>5)6)</sup>

鑄込方向に垂直な 1/4 断面について、直接差分法による2次元伝熱計算を行った。2次冷却帯については、スプレー帯、スプレー水流下帯、放熱帯の3つに分割し熱伝達を各面でパターン化して計算した。凝固シェル厚みの計算結果を Fig. 4 に前述した実測値と併せて示し

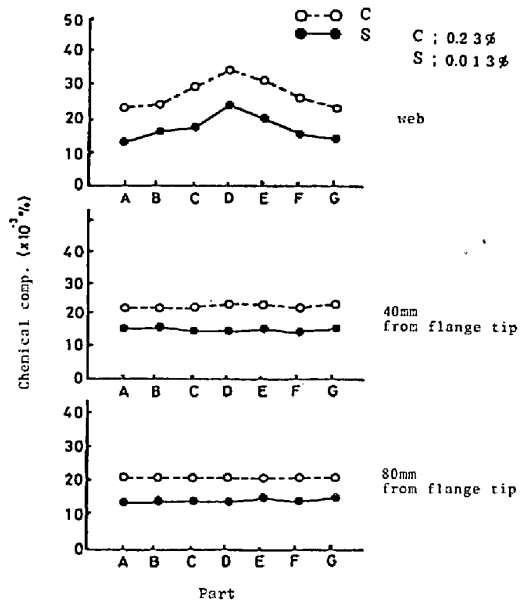


Fig. 6. Distribution of C and S at web and flange.

た。Fig. 5 にこのモデルによつて計算された凝固シェルの生成状況を示した。同図より次のことが明らかになった。

- ① 最終凝固位置はフィレット部でありフランジの表面中央から 100 mm 中心に寄つた位置である。
- ② ウェブの凝固が進行するに従い未凝固プールの形状は鋭角三角形から楕円形に変化する。

3.2.2 凝固組織と成分偏析<sup>3)</sup>

鑄片ウェブ部分での等軸晶は中心で僅かに認められる程度であり、R内側の柱状晶は、R外側のそれより長く、R内側柱状晶はウェブ厚みの中央部まで達する。ウェブの凝固が進行すると残溶鋼は左右のフランジ部に分割され、最終凝固位置は等軸凝固し、偏析は軽度である。最終凝固位置におけるウェブおよびフランジ部の偏析状況を調査するため 1 mm ピッチでその中心部を切削しCおよびSを分析した。結果を Fig. 6 に示した。フランジ部では各成分の偏析は認められないが、ウェブ部では偏析が認められ、ウェブ中央部の最終凝固位置で最大偏析となる。フランジ部は勾配のついた形状であるため、フランジ先端部分からフランジ中央にかけて凝固完了位置が移動するに従つて濃化溶鋼はフィレット部へ排出され、成分の偏析は起きず、ウェブ部中央は通常スラブの凝固の場合と同様に横断面内の溶鋼流動はほとんど無い状態でウェブ全幅にわたつて凝固するので中心偏析が発生するものと考えられる。

3.3 代表的な表面欠陥とその防止法

ビームブランク鑄片の代表的な表面欠陥は、ウェブおよびフランジの中央部に発生する縦割れである。フラン

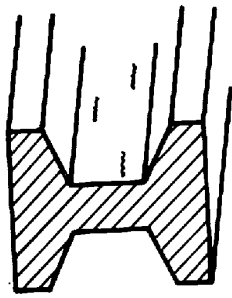


Fig. 7. Schematic representation of longitudinal facial crack in web.

ジ中央部の縦割れはモールド銅板突き合せ部の平滑化、銅板締付力の増大およびモールドパウダーの採用により解決できる<sup>1)</sup>。以下にウェブ縦割れ防止方法について報告する。

3.3.1 ウェブ縦割れ

Fig. 7 にウェブ縦割れ模式図を示した。割れ部には内部酸化および脱炭組織が認められ<sup>7)</sup>、モールド内で生成した割れ欠陥と推定された。

1) 溶鋼成分の影響

一般に鋼中[S]は、割れ感受性を高める元素として知られているが、ウェブ縦割れについても割れと[S]含有量との間には強い相関があり[S]含有量が増加するに従って割れが増加する<sup>7)</sup>。また Mn 含有量が増大するに従いウェブ縦割れが増す傾向にあるが[S]ほど顕著でない。

2) モールド内凝固に影響する各種の要因について

モールドパウダーについては多くの研究がなされており、その熔融特性や粘性と縦割れ発生とが密接な関係にあることが知られている<sup>8)</sup>。パウダー特性とウェブ縦割れに関する調査結果を Fig. 8 に示した。パウダー(E)

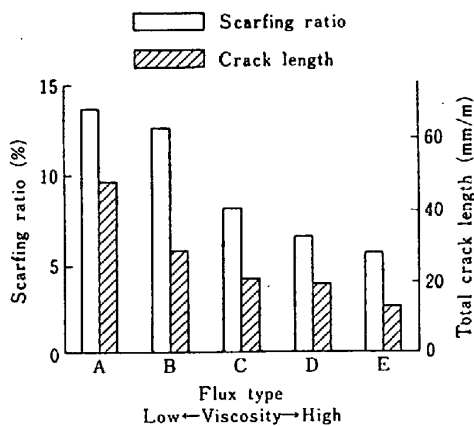


Fig. 8. Effect of powders on longitudinal crack at web.

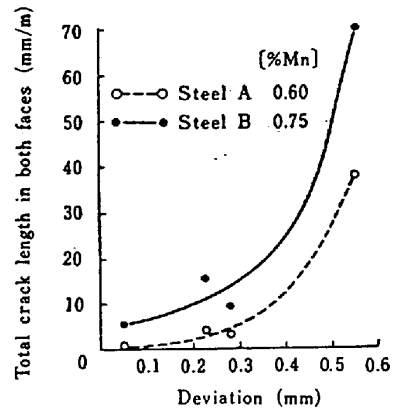


Fig. 9. Effect of deviation of oscillating mold from the standard strand curvature upon longitudinal cracks at web.

は高粘性で、ウェブ縦割れ長さが他の種類のパウダーを使用した場合より短く手入率も低い。一般にパウダーの粘性が低すぎるとパウダーの流入量は増大し、局部的に過剰流入を起こしてシェル不均一冷却を生じやすい<sup>8)</sup>。ビームブランクの連鋳では形状が複雑なため、この影響が顕著に現れ、通常のブルーム用パウダーより粘性の高いものがよいと推定される。パウダーの流入に与えるモールドオシレーションの影響についても最近研究がなされているが<sup>9)10)</sup>、ビームブランク連鋳においても、オシレーションの横振れとウェブ縦割れとの間に顕著な関係が認められる。Fig. 9 にオシレーションにより発生するモールドの基準湾曲面からR中心方向への変位量とウェブ縦割れとの関係を示した。変位量が 0.2 mm 以上になるとウェブ縦割れは急増する。スラブ連鋳機の場合と同様に、パウダー膜厚変化が不均一冷却やパウダーの不均一流入をひき起こし<sup>11)</sup>、ウェブの表面縦割れが発生しやすい状態になると考えられる。従って変位量を 0.1 mm 以内に保つて操作することがウェブ縦割れ発生防止上重要である。その他、モールド冷却水量、水温、モールドテーパー、モールド冷却水パターンなどの影響も重要である<sup>12)</sup>。また2次冷却の影響も顕著であり、モールド直下のスプレー水量は少ない程ウェブ縦割れの発生率は低い<sup>9)</sup>。

3.4 内部欠陥と防止法

3.4.1 鋳片支持方式と内部応力および歪みについて

ビームブランク鋳片の変形と内部欠陥を防止するため鋳片支持方式と凝固シェル内の応力および歪みの分布を有限要素法による平面および立体シェル弾性応力解析により検討した<sup>12)</sup>。凝固シェル内に発生する応力は、塑性域に入るため厳密には弾塑性解析を必要とするが、平面シェルについて弾性および弾塑性解析を行った結果、両

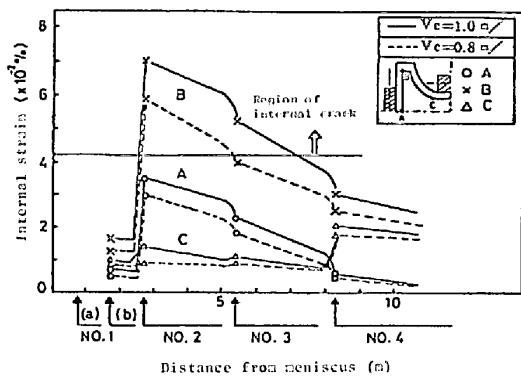


Fig. 10. Internal strain distribution in strand direction in the case of supporting way of cast blanks shown in fig. 3.

者の間に歪み変化などに関し全体的な傾向には大きな差は認められなかつたので、相対的な尺度としては弾性解析で十分であると考えた。静鉄圧によるバルジング歪みおよび変位量は立体シェル解析による検討を、フランジチップなどの局所的な点については平面解析による検討を行つた。Fig. 10 にフランジ中央(A)、フランジチップコーナー(B)、およびウェブ(C)における凝固界面の歪み最大値を示した。各部の最大歪みは凝固の進行に伴つて減少し、铸造速度の増大とともに増大する。また、その値は、フランジチップのコーナー、フランジ中央、そしてウェブの順に小さくなつてゐる。

3.4.2 内部割れ

ビームブランクの内部割れはフランジ端部およびウェブの表面下 10~40 mm に認められる軽微なラディアルストリーク状の割れであり、フランジ中央部付近には観察されない。これらの内部割れを防止するため、前節で示した解析モデルを用いて検討した。固液界面の最大歪は、フランジチップ部が最大で、フランジ中央部、ウェブの順に小さくなり、ウェブ部の内部歪は、内部割れの認められないフランジ中央部の歪みよりかなり小さく、計算上では、ウェブ内部割れは発生しにくいと予想される。従つてウェブに認められる内部割れは計算上考慮されていない他の要因、例えば、ウェブロールによる鱗片の変形などによるものと思われる。

今回の計算条件のもとで内部割れ発生限界の歪み( $\epsilon_c$ )は、フランジチップに内部割れが発生していることから、この点の歪みより小さく、一方フランジ中央に内部割れは発生しておらず、この点の歪みより大きいと考え、仮定の許容内部歪み  $\epsilon_c$  として、 $4.2 \times 10^{-2}\%$  を採用した。 $\epsilon_c$  を、 $4.2 \times 10^{-2}\%$  に抑える対策を検討し、Table 3 に示した。最も内部歪みの大きい No. 2 セグメントにおいてロールピッチを縮少すること、および

Table 3. Supporting method of strand and internal strain ratio proportioned to the allowable strain.

Supporting method	Crack	Ratio (No. 2 seg.)	
		flange	flange tip
Full-support against flange face	cracked	0.96	1.40
2/3-Reduced roll-pitch	non-cracked	0.65	0.86

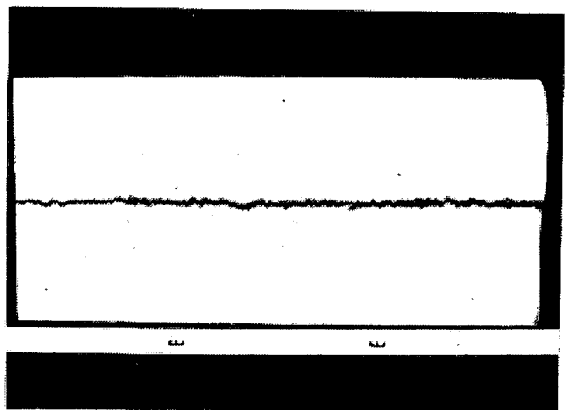


Photo. 1. Internal crack in web.



Photo. 2. Electron microscope picture of internal crack surface.

No. 1~No. 3 セグメントのフランジを全面支持することにより、フランジ先端の内部割れを防止できるとがわかる。

3.4.3 ウェブ断面割れ

ウェブ中央の板厚方向 1/2 に、Photo. 1 に示したような割れの発生することがある。この割れは、铸造速度および鋼中Sが高いほど発生しやすい。Photo. 1 のマクロ組織を観察すると中心部に連続した割れが認められ、破面形状は上下でよく一致したものとなつてゐる。

これは、ウェブ凝固直後に厚さ方向の応力によつて発生したものと想定される。ウェブ断面割れの電子顕微鏡結果を Photo. 2 に示したが、破面は明らかにデントリティックな様相を示している部分があり、最終凝固時の自由凝固面も観察される。スラブ連鋳でも同様の欠陥が発生する<sup>13)</sup>が、これは凝固先端に封じ込められた溶鋼が凝固する際に生じた収縮孔であり、操業条件（鋳造速度、成分）の変化によつて発生するとされている。ビームブランクの場合も同様にウェブの最終凝固に際し中心部ではキャビティが残存し、凝固過程およびその後の冷却過程で発生する熱応力により、ウェブ中心に板厚方向の引張応力が発生し、前述のキャビティを起点として中心部が開口したものと考えられる。したがつて断面割れ防止のためには、ロールミスアライメントの防止が重要であることのほかに、ウェブ中心部での板厚方向の引張り応力を緩和することが重要であり、特に鋳造速度の増大に際しては、この点を考慮して鋳片支持方式を改善する必要がある。

3.5 鋳片支持方式の改造と鋳造速度の増大<sup>14)</sup>

ビームブランク鋳片の品質欠陥とその防止法について述べたが、ビームブランク連鋳で鋳造速度を規制してい

るのは、Photo. 3, 4 に示したウェブ断面欠陥および異常バルジングの発生である。既に述べたように、ウェブの断面欠陥は、ウェブ部の凝固完了まで支持すれば発生しないわけではなく、フランジ部の支持方法、フィレット部の凝固形態（未凝固のプール形状、凝固完了位置など）に依存すると考えられる。従来の経験では、鋳造速度が 0.95 m/min を起えた場合にウェブは No. 2 セグメント内で凝固しているにもかかわらず Photo. 4 に示した異常バルジングが見られた。そこで前章の解析モデルを用い鋳片支持方式の改善案を検討し鋳造速度を上昇する実験を行つた。ローラーエプロンの改造模式図を Fig. 11 に示した。いずれもフランジ先端における反り、ウェブ高さの増大を防止することにより凝固シェル内の歪を軽減することが目的である。Fig. 12 に各方式における高速鋳造結果を示した。鋳片支持方式として鋳型内メニスカス下 8 m までフランジを全面支持することにより鋳片変形量（図中 a-b）は従来の 1/5 程度に減少し、異常バルジングの発生を防止しつつ鋳造速度を 0.85 m/min から 1.0 m/min まで増大することが可能となつた。さらに、特殊ロールを採用することによりフランジの先端を支持した場合は鋳造速度を 1.2 m/min まで増大することが可能となつた。



Photo. 3. Internal crack in web.

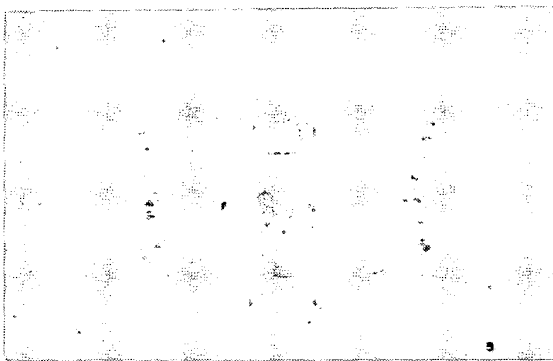


Photo. 4. Sulfur print of a bulging defect caused by ferrostatic pressure at the fillet of a blank due to excessive casting speed.

	Type A	Type B	Type C
No.3 Segment			
No.4 Segment			

Fig. 11. Type of strand support.

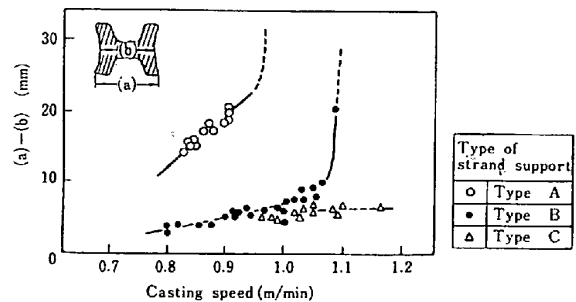


Fig. 12. Relation between casting speed and deformation of B. B.

### 3.6 鑄造鋼種および操業

ビームブランク連鑄機の適用鋼種としては、一般 40 キロ鋼および 50 キロ鋼がその大半を占めるが耐候性鋼、耐海水性鋼なども製造している<sup>1)</sup>。特殊な例としては直線形シートパイルもビームブランクを素材として製造している。ビームブランク鑄造時における鑄造時間率は 90% 以上に達しており、ビームブランクの鑄込みチャンスでは、ほぼ全量、連続～連続鑄造を行つている。また連鑄歩止は 99.6% に達しておりこれは、タンディッシュおよびダミーバー当たりの連々数が、おのおの 10.9, 36, 4 と高い結果である。すなわち、タンディッシュノズルの改善および単一のビームブランクサイズから多サイズの製品圧延を行う圧延技術<sup>15)</sup>の改善が操業成績向上に寄与している。また、ビームブランクでは、ワールド内異鋼種混合方式による異鋼種連々を行つており、これらタンディッシュノズルの改良や異鋼種連々鑄により、ダミーバー当たりの最大連々数は 142 ヒートに達した。

## 4. 結 言

水島製鉄所第 3 連鑄機（ブルーム、ビームブランク兼用機）は 1973 年に稼動して以来順調に操業を続けている。本機は Algoma 社のビームブランク連鑄機を参考にし、次のような改善を実施したものである。

1) 冷却水、パウダー物性、オツシレーション横振れ等初期凝固に関する改善による表面品質の向上。

2) 鑄片支持方式の改善による鑄造速度の増大。  
この結果、鑄片をほぼ全量無手入れで次工程へ熱片発送し、単一サイズの素材から多サイズの H 形鋼を省エネル

ギで製造するプロセスを確立した。このように高品質で、製品に近い素材を鑄造することが可能なビームブランク連鑄機は今後も適合性を見出しつつ増大するであろう。

## 文 献

- 1) 大森 尚：第 69 回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編）
- 2) G. S. LUCENTI: Blast Furn. Steel Pl., (1970) Jan., p. 19
- 3) 第 59 回製鋼部会，川崎水島（1974）
- 4) J. E. LAIT and I. K. BRIMACOMBE: Open Hearth. Proc. AIME, 56 (1973), p. 269
- 5) 八百 升：第 24 回中四国講演会概要集（1979）
- 6) 八百 升，上田徹雄，一宮正俊，清原庄三，岩崎健，藤村俊生：鉄と鋼，66 (1980) 4, S 188
- 7) 野崎 努，伊丹俊夫，児玉正範，村田賢治，深井真，松野淳一：川崎製鉄技報，9 (1977) 3, p. 11
- 8) 江見俊彦，中戸 参，鈴木康治，飯田義治，上田典弘：鉄と鋼，60 (1974) 7, p. 981
- 9) 塗 嘉夫，大橋徹郎：鉄と鋼，65 (1979) 11, S 702
- 10) 石田寿秋，北川 融，川和高穂，宮下芳雄：鉄と鋼，64 (1978) 11, S 655
- 11) 児玉正範，大西正之，橋 林三，野崎 努，小沢三千晴，岡野 忍，岩崎利雄，吉門照幸：川崎製鉄技報，9 (1977) 1, p. 14
- 12) 大西正之，上田徹雄，新庄 豊，溝田久和，八百升，藤村俊生：川崎製鉄技報，12(1980) 3, p. 10
- 13) 原田慎三，草野昭彦，三隅秀幸：製鉄研究，294 (1978), p. 72
- 14) 飯田義治，守脇広治，上田徹雄，藤村俊生，有吉政弘，溝田久和：鉄と鋼，65 (1979) 11, S 759
- 15) 田中輝昭，山下政志，永広尚志，人見 潔，草場隆，阿久根俊幸：川崎製鉄技報，10(1978)4, p. 69