

## 神戸 3 号連鑄における強圧下法の開発

Development of the Hard Reduction Method in the No. 3 Bloom Caster at Kobe Works

(株)神戸製鋼所 神戸製鉄所 下野 茂治\*・川崎 正蔵・高木 功  
 加古川製鉄所 蝦名 清  
 鉄鋼技術研究所 綾田 研三

## 1. 緒言

ブルーム連鑄鑄片の中心偏析改善対策として、低温鑄造および鑄型内と凝固末期の組み合わせ電磁攪拌による鑄片中心部の等軸晶の拡大と微細化を推進してきた。これにより高炭素鋼においても微細な等軸晶を得ることができ中心偏析は大幅に改善された。<sup>1) 2)</sup> しかし、一部中心偏析厳格材については、炭素の均熱拡散により対応してきたが、マクロ組織の改善には限界があった。この問題解決のため、更に一層の中心偏析改善を目指して凝固末期圧下実験を進めてきた。

また、凝固末期圧下実験と併せて凝固末期部におけるバルジング量および鑄片圧下による界面変形量の定量的把握法を実験と数値解析により開発した。この方法により、凝固末期部でのロール間サクション流動量および圧下によるスクーズド流動量の算出が可能になった。併せて、圧下による凝固界面歪の算出値に基づき、内部割れにたいするクライテリアを設定した。

これらにより、内部割れを引き起こさない、大径ロールによる強圧下法を開発し、ブルーム連鑄での一層の中心偏析改善が可能となった。

本報では、これら強圧下技術の開発概要について述べる。

## 2. 3号連鑄機のロールプロフィールと圧下設備仕様

神戸製鉄所 3 号連鑄機のロールプロフィールを図 1 に、圧下設備仕様を表 1 に示す。

第 1 次実験は既設 400 mm 小径ロールでの 5 段圧下装置、第 2 次実験は 1000 mm 大径ロールによる 2 段圧下装置を用いて圧下実験を行った。また、'91年 2 月に実機設備として 1000 mm 大径ロールの 3 段圧下設備を設置した。

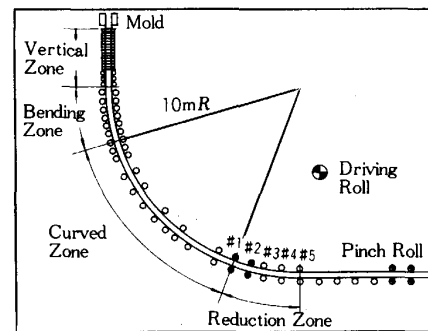


Fig. 1 Schematic view of Kobe No. 3 C.C.

## 3. 圧下実験結果

## 3.1 実験方法

実験の対象とした鋼種は 0.82% C 鋼である。鑄造速度は 0.7 m/min. 前後で変化させ適正鑄造速度を選んだ。

中心偏析の評価は鑄片縦断面のサルファープリントで行うとともに、鑄片縦断面の中心線に沿って 5 mm ピッチで採取した試料と、155 mm ビレットの中心線に沿って 3 mm ドリルで 50 mm ピッチで採取した試料の C 偏析度で評価した。更に 5.5 mm 線材での C、P 偏析点で評価した。

Table 1 Experimental conditions

Item		Experiment Condition	
Reduction Zone	Roll Number	#1~5	#3,4
	Number of Reduction	5	2
	Roll Diameter	400mm	1000mm
	Roll Pitch	1200mm	
	Zone Length	4800mm	1200mm
Steel Grade		0.82% C Steel	
Casting Speed		≈0.70m/min	
$W_s$		0.47l/kg·s	
$\Delta T$		20~35°C	

平成 4 年 3 月 18 日 受付 (Received Mar. 18, 1992)

\* Shigeharu Shimono (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd., 2 Nadahamahigashimachi Nada-ku Kobe 657)

### 3.2 第1次実験結果

400mmロールを用いて5段圧下と3段圧下を実施した場合の、総圧下量と中心偏析度  $C_{max}/C_0$  および内部割れ長さの関係を図2.に、鑄片縦断面の組織を図3に示す。中心固相率0.2~1.0の範囲にわたり5段圧下を実施した場合、鑄片総圧下量が大きいほど中心偏析が改善されているが、圧下位置での凝固界面が柱状晶域内であるため内部割れが発生する。

内部割れ発生を防止するため、凝固界面が微細等軸晶組織となるようNo.3~5ロールでの3段圧下を実施した結果、内部割れは大幅に改善されたが、5段圧下時に比べて中心偏析度の改善は少ない。

### 3.3 第2次圧下実験

1000mm大径ロールを用いて中心固相率0.5~1.0の範囲にわたり2段圧下を実施した場合の総圧下量と中心偏析度および内部割れ長さの関係を図2.に、鑄片縦断面の組織を図4.に示す。

大径ロールで圧下した場合、小径ロールよりも少ない圧下量で中心偏析が改善されており、また、等軸晶域内での圧下のため内部割れ発生も大きく改善される。

しかし、圧下量を過大にした場合には、内部割れが発生すると共に逆V偏析になる。

## 4. CAEによる凝固末期鑄片変形解析

### 4.1 鑄片変形解析を実施した背景

第1次実験での400mm小径ロールによる圧下では、中心偏析は改善されるが内部割れが発生するという問題点が発生した。そこで、内部割れを発生せずに中心偏析を改善するには、偏析改善および内部割れ発生メカニズムを定量的に把握し、圧下効率に優れた圧下方法を開発する必要がある。しかし、定量的に把握する上で、バルジングおよび凝固収縮による溶鋼のサクシオン流動量と圧下によるスクウィーズ流動量の定量化がなされていない。また、圧下時の凝固界面の歪および内部割れにたいするクライテリアのデータがないことから数値計算と実験を組み合わせた問題解決を実施した。

	Roll diameter	Number of roll	Fraction of solid	Solidification front structure
●	φ400	#1~5	0.2~1.0	dendritic
○	φ400	#3~5	0.5~1.0	equiaxed crystal
☆	φ1000	#3~4	0.5~1.0	equiaxed crystal

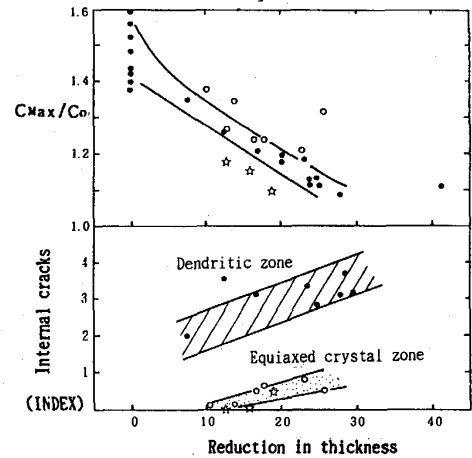


Fig. 2 Relationship between reduction and center segregation and internal cracks

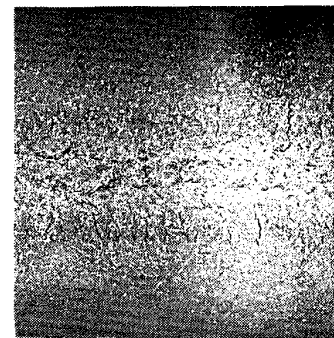


Fig. 3 Typical sulfur print of longitudinal section of cast strand in first stage reduction test

Condition	No	Optimum	Over Reduction
Segregation	V-seg.	No	Inverse V-seg.
Internal Crack	No	No	Occured

Center			
Casting Direction			

Fig. 4 Structure of longitudinal cross-section in the second stage reduction test.

4.2 バルジグ解析

鋳片バルジグ変形は汎用有限要素解析コード ANSYSを用いた3次元非線形クリープ計算により求めた。

バルジグ解析用モデルは、1ロールピッチ間における3次元データとし、凝固シェル形状は凝固計算結果より求め、fs 1.0以下の未凝固部は中空と仮定した。また高温でのヤング率、クリープ定数を定量化するため800℃から1300℃の温度範囲にわたって引張試験とクリープ試験を実施した。その1例を図5.に示す。

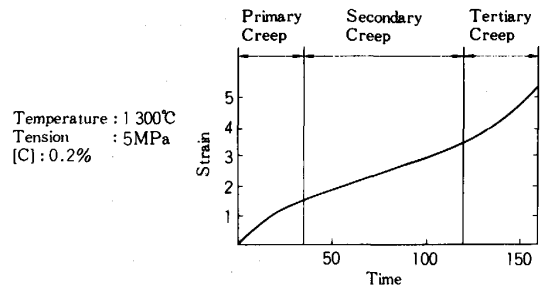


Fig. 5 Example of creep test in high temperature

今回実施したバルジグ計算の正当性を確認するため実機にてレーザー変位計を用いて実鋳片のバルジグ変形量を測定した。S48Cのメカニカスから15M地点での測定結果と計算値との比較を図6.に示すが、両者はほぼ一致した値を示しており、このことから、バルジグ解析手法・凝固計算・高温物性値等の妥当性が立証された。

4.3 圧下変形解析

凝固末期圧下による鋳片変形解析を行うため、剛塑性有限要素法による3次元剛塑性解析プログラムを開発した。<sup>3)</sup> 圧下変形のモデルは未凝固部を中空と仮定した3次元データとし、境界条件は、ロール圧下時の接触面とそれ以外の自由表面で与えた。

本解析の妥当性を確認するため、中空部分を有するテストピースを加熱後ロールで圧延したときの幅広がり量と中空部の変形量の計算値と実測値を比較したが、両者の値は非常によく一致している。

内部への圧下量を十分確保でき且つ凝固界面歪を小さくできる圧下方法を開発するため、圧下ロール径に着目し、表面圧下量に対する中空部変形量と歪量を計算した結果を図7.に示す。同一の中空変形量を得るためには、大径ロールの場合、小径ロールと比較すると表面圧下量・凝固界面歪ともに低減でき圧下効率に優れている事が分かった。

以上の解析結果より、第2次テストとして圧下ゾーンのNo.3・4ロールを圧下効率の良い1000mm大径ロールに改造した。

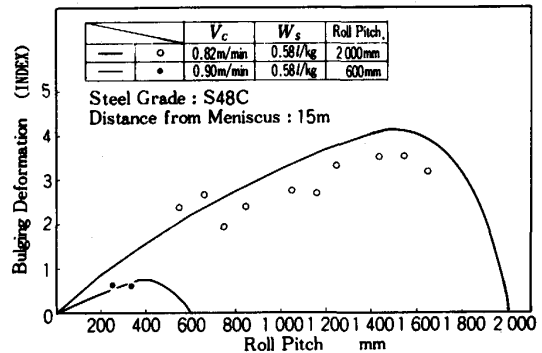


Fig. 6 Comparison between analysis and measurement of inter roll bulging

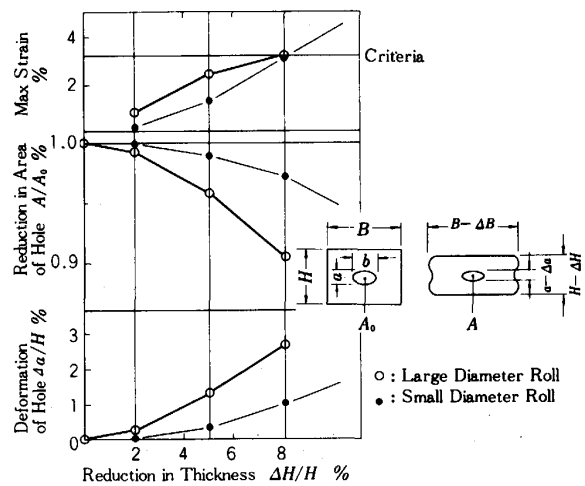


Fig. 7 Influence of reduction roll diameter on deformation and strain of solidification front

5. 偏析改善メカニズムに関する考察

5.1 サクション流動量とスクイズド流動量の関係

第1次実験及び第2次実験で、中心偏析改善が図られたケースのロール間サクッション流動量と圧下によるスクイズド流動量の関係を図8に、圧下による中心固相率の変化を図9に示す。第1次実験では、五段圧下するも、最初の二段しか未凝固部のスクイズに寄与しておらず、第2段圧下後の中心固相率は0.53に止まっている。これに対し、第二次実験の結果は、サクッション流動量より、スクイズド流動量が少なからず増さり、第二段圧下後の中心固相率は0.83に達している。これらの事から、中心偏析改善効果はただ単に、サクッション流動量とスクイズド流動量とのバランスあるいは圧下後の中心固相率からだけでは、説明できないことが分かる。

5.2 中心偏析改善効果のメカニズム

中心偏析は未凝固溶鋼の流動速度と流動時間の積の増加と共に増加する。すなわち移動距離が長くなるほど中心部に濃化溶鋼が集まりやすいと仮定し、中心部の未凝固溶鋼の流動速度Vは固相率fsの増加につれて減少すると考えると、流動速度Vと時間tとの積を、中心固相率が0.2~0.9まで変化する時間での積分で得られる値を偏析指数Sと定義できる。この偏析指数SとC<sub>Max</sub>/C<sub>O</sub>の関係を図10に示すが、中心偏析度が、第1次実験および第二次実験ともほぼ同一の曲線で示され、偏析改善効果の推定が可能となる。<sup>4)</sup>

6. まとめ

凝固末期部における鑄片の変形挙動の定量的把握法を実験と数値解析により開発し、偏析改善メカニズムを定量的に解明した。凝固界面歪を小さくでき、且つ、内部への圧下量を十分確保できる大径ロールを用いた強圧下法により、内部割れを発生させずに中心偏析を改善できる技術を確認した。この技術を活用するために、'91年2月に神戸製鉄所No.3ブルームCCに強圧下実機設備を設置し、順調に稼働している。

参考文献

- 1) 吉井ら；神戸製鋼技報 R & D Vol.31, (1981) 14
- 2) 川崎ら；KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW Vol.3 (1988) 23
- 3) 豊島ら；塑性と加工, Vol.31, No.350 (1990-3)
- 4) 綾田ら；材料とプロセス Vol.4 (1991)-299

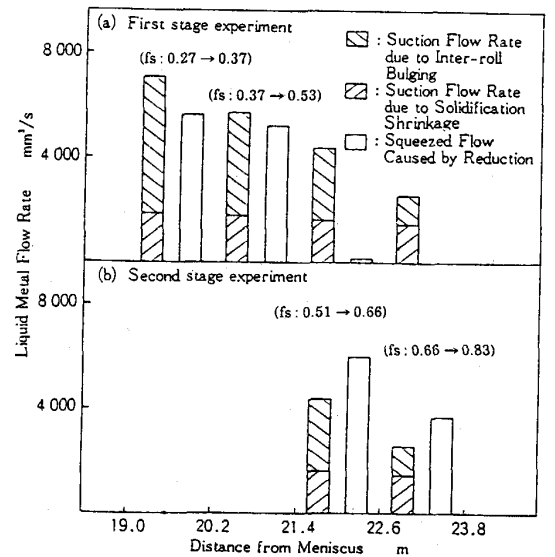


Fig. 8 Relationship between suction flow and squeezed flow in first stage experiment as well as in second stage

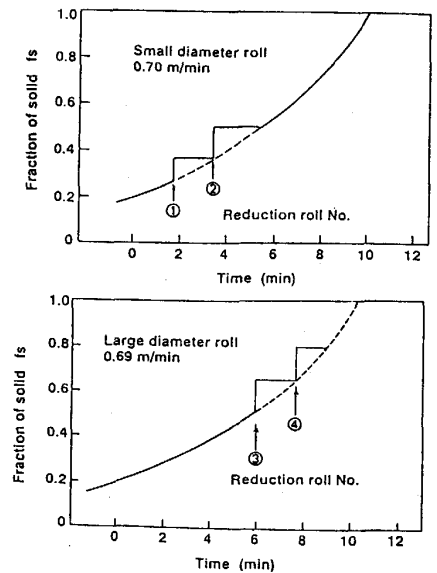


Fig. 9 Transition of fraction of solid (fs)

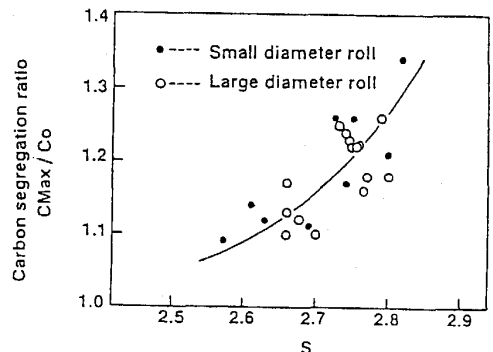


Fig. 10 Relationship between S value and center segregation