

ビレット連続鑄造における高速鑄造用モールド (NSハイパーモールド)の開発

High Speed Casting Mold for Billet Caster (NS Hyper Mold)

橋 高 節 生^{*(1)}
Setsuo KITTAKA

上 原 政 次^{*(2)}
Masatsugu UEHARA

佐 藤 寿 樹^{*(1)}
Toshiki SATO

東 博 文^{*(3)}
Hirohumi HIGASHI

抄 録

高速鑄造技術はビレットの生産性向上に対して魅力的な手段である。新日本製鐵は長寿命で安定性のある高速鑄造用モールド(Xモールド)の開発を1993年から手掛けてきた。Xモールドは世界各地に多数の納入実績を有する。そして新日本製鐵はXモールドと他技術を融合した新しい高速鑄造用モールドNSハイパーモールドを開発した。1998年にNSハイパーモールドを設置した共英製鋼 山口事業所におけるビレット高速鑄造結果を報告した。鑄片品質を保ちながら130mm□×6m/minの高速鑄造を達成できる見込みを得た。

Abstract

The high speed casting technologies is an attractive tool to increase the productivity of a billet continuous casting machine. Nippon Steel developed a high speed stable casting and long life mold called X mold 6 years ago. X mold has gained many customers around the world. Now Nippon Steel has newly developed a higher speed mold called "NS Hyper Mold" which is combined with X mold and other new technologies. This paper presents the splendid results obtained by a billet caster situated at Kyoei Steel in Yamaguchi, where Nippon Steel installed a NS Hyper mold one year ago. These results will lead casting speed for 130 × 130 mm² billet to 6 m/min with excellent high quality.

1. 結 言

ビレット連続鑄造における高速鑄造の課題としては、モールド内不均一凝固に起因する菱形変形、オフコーナー割れおよびブレイクアウト等の品質問題があるが、なかでもオフコーナー割れおよびこれに伴うブレイクアウトが最大の課題である。この課題の解決策として、新日本製鐵は均一冷却効果に優れたXモールドを1993年に開発し、菱形変形およびモールド内不均一凝固に起因したオフコーナー割れ問題を解決してきた^{1,2)}。本論文では更に改善を加えた“NSハイパーモールド”を開発し、鑄片寸法130mm×130mm、鑄造速度5~6m/minの高速鑄造を実現したので報告する。NSハイパーモールドの特長を以下に示す。1)高速鑄造：鑄片寸法130mm×130mm、鑄造速度で5m/minの高速鑄造を達成し、6m/minを目指している。2)高品質：菱形変形防止、ブレイクアウト防止、コーナー割れ防止、表面品質の改善。3)操業安定性：モールドレベル、スーパーヒート、鑄造速度変動に強く、安定鑄造が可能。4)長寿命：通常モールドに比べて、3倍の長寿命化。

2. 共英製鋼 山口事業所における高速鑄造テスト

2.1 オフコーナー割れの発生原因および防止策

オフコーナー割れの発生原因は、その発生個所が表層下5~

10mmであることより、モールド内あるいはモールド直下部でのバルジングによるものであるとBrimacombeらにより詳細に報告されている³⁾。従って、オフコーナー割れ防止策としては、モールド内およびモールド直下でのバルジング防止のために下記の対策が有効であると考えられる。

1) モールド内バルジング防止

- ・モールド内での均一冷却によるコーナー凝固遅れの防止 …Xモールド
- ・モールドテーバの最適化 …ダブルテーバ

2) モールド直下バルジング防止

- ・鑄片サポート長の延長 …ロングモールド+フートルール
- ・鑄片シェル剛性強化 …モールド直下強冷却

共英製鋼 山口事業所で、上記バルジング防止策の確認テストを行った。テストの内容としては、最初にXモールドのモールドテーバの最適化を行い、モールド長さは現状の800mmでフートルール2段化のテストを行った。設備仕様を表1に示す。

2.2 モールドテーバ最適化

鑄片寸法135mm×150mm、鑄造速度3.5m/minでのモールドテーバの最適化のテストを行った。使用したモールドはXモールドで、モールド長さ800mm、フートルール1段のものである。モー

^{*(1)} プラント事業部 製鉄プラント第二部 マネジャー
福岡県北九州市戸畑区大字中原46-59 ☎804-0002 ☎(093)872-6986

^{*(2)} エンジニアリング振興協会 業務部 課長

^{*(3)} 日鉄プラント設計 掛長

ルド内鑄片の凝固収縮プロフィール計算値を図1に示す。通常モールドの場合、中炭素鋼と低炭素鋼ではモールド内抜熱量が異なるため両者の凝固収縮量は異なり、モールド下端で中炭素鋼が低炭素鋼のそれより約0.4mm大きい。Xモールドの場合は、モールド表面の人工的溝により形成されるエアギャップの緩冷却効果のため、中炭素鋼と低炭素鋼のモールド内抜熱量はほぼ同じになり、結果として両者の凝固収縮量はほぼ等しくなる。従って、Xモールドの場合は凝固収縮量は鋼種に依存しないため、モールドテーパの最適化が容易に行える。

モールドテーパの最適化として次の4種類のテーパについてテストを行った。

- ・テーパ1：シングルテーパ 0.6%/m
- ・テーパ2：シングルテーパ 1.0%/m
- ・テーパ3：ダブルテーパ 2.0%/m, 0.3%/m
- ・テーパ4：ダブルテーパ 2.2%/m, 0.3%/m

モールドテーパをテーパ1 (0.6%/m) からテーパ3 (2.0%/m) へ大きくするに従い、オフコーナー割れおよびそれに伴うブレイクアウトは減少するが、まだ満足できるレベルではなかった。また、テーパ4ではモールド内で首吊りタイプのブレイクアウトが発生したため、2.2%/mは強テーパの上限界と考えられる。本テストの場合にも鑄片にオフコーナー割れが見られた。このモールド内のテーパの改善後、オフコーナー割れを更に改善するためにはモールド直下バルジングの改善が必要である。

2.3 モールド直下バルジング対策

(1) モールド直下バルジング解析

鑄片寸法135mm×150mm、鑄造速度3.5m/minの場合のモールド直下バルジングについてFEM解析を行った。解析モデルは図2に示すようにモールド下端から400mmの範囲の鑄片の1/4断面とし、フートロール無し、1本、2本の3ケースについて比較検討を行った。解析結果を図3にバルジング変位(断面B-B')、図4にバ

ルジング歪み(断面C-C')を示す。バルジング変位量はフートロール無しの場合1.5mmであるが、フートロール1本の場合は0.6mm、フートロール2本の場合は0.3mmに減少する。又、バルジング歪みはフートロール無しで0.8%、フートロール1本で0.35%、フートロール2本では0.25%である。

本解析結果より、フートロール1段の場合のオフコーナー割れは#1フートロールの下流側(モールド下端より220mmの位置)のピー

Molten steel temperature	T_0	1 433°C
Shell temperature	T_{1top}	1 190°C
	$T_{1bottom}$	945°C
Shell thickness	S_{top}	6.0mm
	S_{bottom}	9.7mm
Molten steel static pressure	P_{top}	0.049N/mm ²
	P_{bottom}	0.078N/mm ²

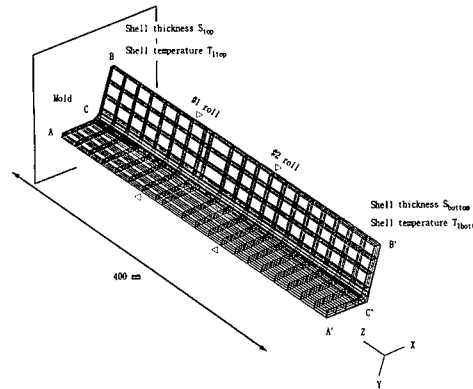


図2 バルジング解析モデル

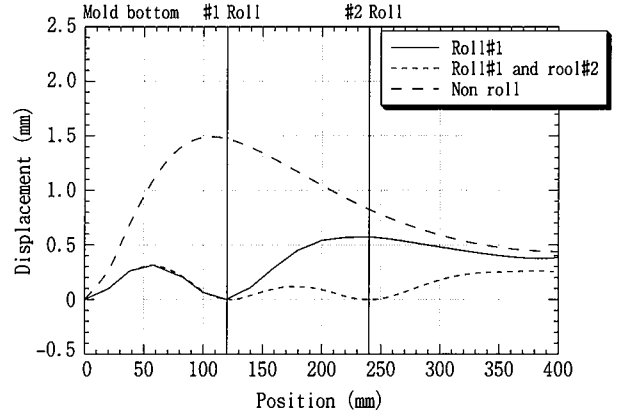


図3 バルジング変位(断面B-B')

表1 連続機設備仕様

Ladle	73 t/heat
Steel grade	Low C, medium C
Strand No.	3 strands
Machine radius	5 m
Size, speed	135mm×150mm, max.3.5m/min 130mm×130mm, max.5.0m/min
Mold	X mold, 800 mm long 1 foot roll, 2 foot roll

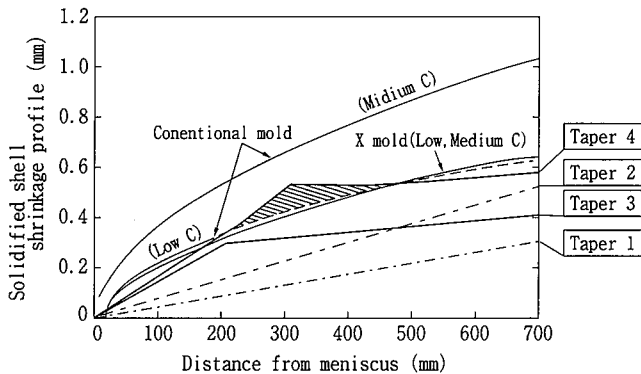


図1 凝固収縮プロフィールとモールドテーパ(鑄片サイズ150mm幅、鑄造速度3.5m/min)

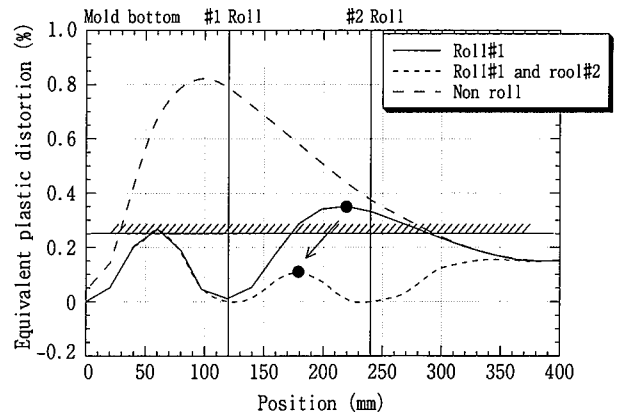


図4 バルジング歪み(断面C-C')

ク歪み0.35%に対応したものであると考えられる。フートロールを2段化およびフートスプレー水を強化することにより、このピークバルジング歪みを0.35%から0.1%へ下げることができる。

(2)フートロール2段化テスト

バルジング解析結果に基づきフートロール2段化のテストを行った。テスト結果は極めて満足すべきものであり、寸法135mm×150mm、最大速度3.7m/min、寸法130mm×130mm、最大速度5.0m/minの高速安定鑄造を実現した。エッチプリントサンプルを図5, 6, 7に示す。オフコーナー割れおよびそれに起因するブ

Composition of molten steel (%)

C	Si	Mn	P	S
0.12	0.14	0.52	0.031	0.038

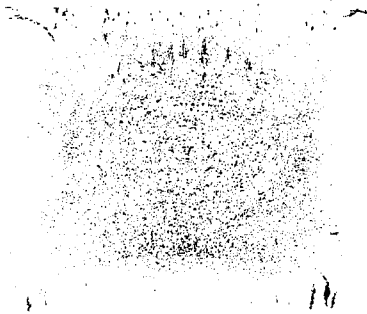


図5 寸法135mm×150mm、速度3.5m/min(フートロール1段)のエッチプリント

Composition of molten steel (%)

C	Si	Mn	P	S
0.12	0.14	0.52	0.031	0.038

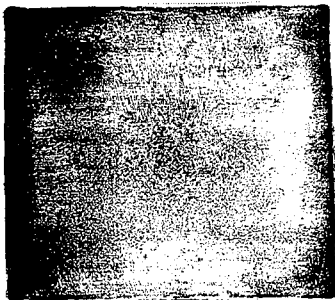


図6 寸法135mm×150mm、速度3.5m/min(フートロール2段)のエッチプリント

Composition of molten steel (%)

C	Si	Mn	P	S
0.12	0.14	0.52	0.031	0.038



図7 寸法130mm×130mm、速度4.8m/min(フートロール2段)のエッチプリント

レークアウトは、フートロール1段の場合8回/月であったものがフートロール2段化によりほぼ0となった。本テスト結果により、オフコーナー割れ防止のためのバルジング限界歪みとして0.25%を得た。

3. モールド長さ制約条件による高速限界の推定

高速鑄造の場合はモールド直下バルジング防止のためモールド長を長くする必要がある。しかし一方ではモールド長を長くしすぎるとモールド内の摩擦抵抗によりモールド出側でシェルが破断する可能性が高くなる。すなわち、高速鑄造時のモールド長についてはバルジング防止より最小長さが存在し、又モールド内摩擦によるシェル破断より最大長さが存在する。以下に、このモールド長さの制約条件による可能高速限界について130mm×130mmの場合を例にとり検討する。

(1)モールド直下バルジング防止に必要なモールド長さおよびフートロール数

寸法130mm×130mm鑄片のバルジング防止に必要なモールド長さとしてフートロール条件を表2に、鑄造速度4.5m/min、6.0m/min、8.0m/minの場合のモールド直下バルジング解析結果を図8, 9, 10に示す。本解析結果より以下のことがわかる。

まず速度4.5m/minの場合は、モールド長が800mmでフートロール無しではバルジング歪みは約0.6%と大きい。フートロールを2段設置するとバルジング歪みは限界歪み(0.25%)以下になる。又、モールド長が1000mmの場合にはフートロール無しでもバルジング歪みを限界歪み(0.25%)以下に抑えることができる。次に速度6.0m/minの場合は、モールド長は1000mmフートロールは2段必要である。さらに速度8.0m/minの場合では、モールド長は1400mm、フートロールは2段必要である。

表2 130mm×130mm鑄片のバルジング防止に必要なモールド長さとしてフートロール条件

Casting speed	Required mold length	Foot roll
4.5 m/min	$L \geq 800$ mm	2 stages
	$L \geq 1000$ mm	None
6.0 m/min	$L \geq 1000$ mm	2 stages
8.0 m/min	$L \geq 1400$ mm	2 stages

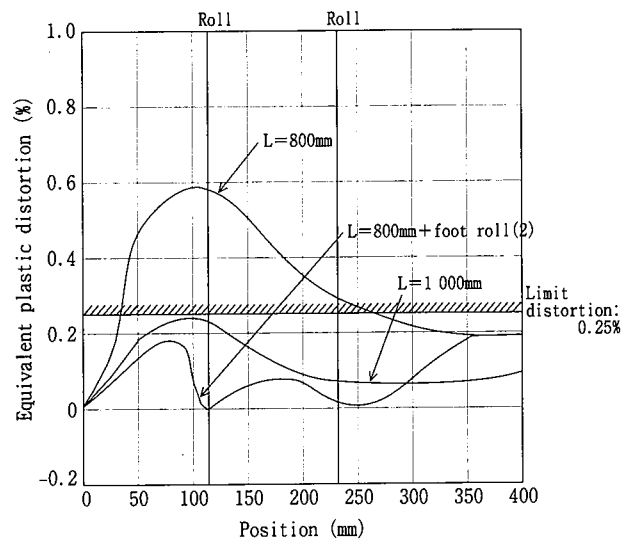


図8 寸法130mm×130mm、速度4.5m/minモールド直下バルジング

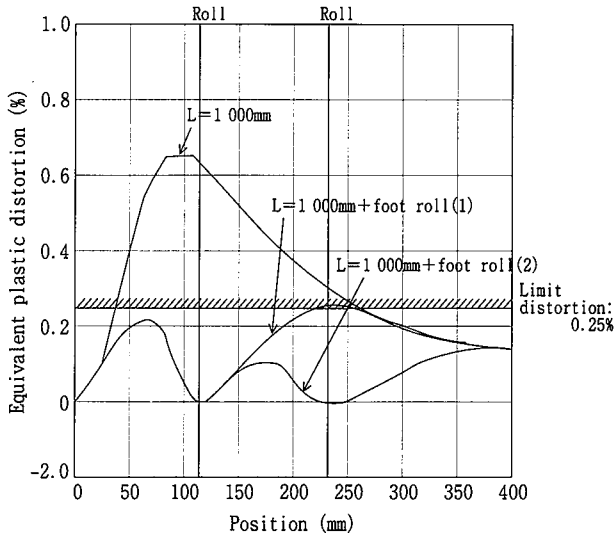


図9 寸法130mm×130mm, 速度6.0m/minモールド直下バルジング

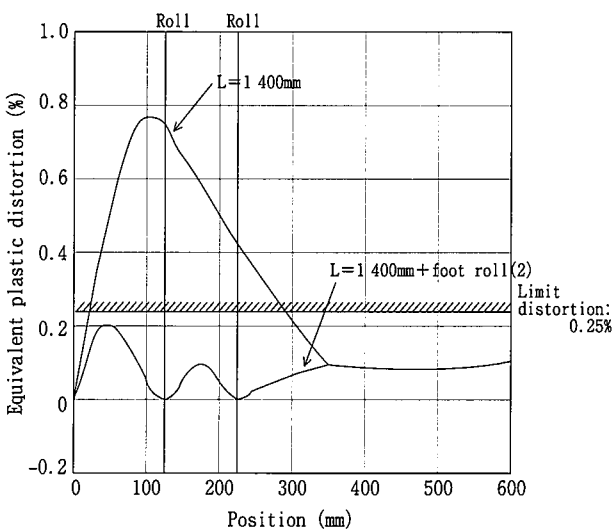


図10 寸法130mm×130mm, 速度8.0m/minモールド直下バルジング

(2) モールド内摩擦抵抗とブレイクアウト条件による可能最大モールド長さ

モールド内摩擦抵抗によりモールド下端で凝固シェルが破断(ブレイクアウト)しないための条件は、木村ら⁴⁾により下記簡易式が報告されている(図11参照)。

[シェル破断強度] > [溶鋼静圧によるモールド内摩擦力]

$$4 \cdot S \cdot W \cdot \sigma_B > 1/2 \cdot \gamma_0 \cdot L_0^2 \cdot 4W \cdot \mu$$

ただし、

S: シェル厚 = $13.8 \sqrt{(L_0 \times 10^{-3} / V)}$ mm, W: ビレットサイズ mm, σ_B : シェル破断応力(1250°C) = 11.76 N/mm², γ_0 : 溶鋼比重 = 0.00007056 N/mm³, μ : シェル/モールド摩擦係数 = 1.0, V: 製造速度 m/min, L₀: モールド実長 mm, L: モールド長さ = L₀ + 100 mm

上式をモールド長さについて解くことにより、製造速度によるモールドの最大長さLを得ることができる。ただし、ビレット連続製造の高速製造時におけるモールド内摩擦係数 μ については信頼できる値が無いため、ここではとりあえず梅田ら⁵⁾により報告されているクロムめっきモールドでの値を用いた。

可能最大モールド長さ $L < 2765.9(1/V)^{1/3} + 100$ (mm)

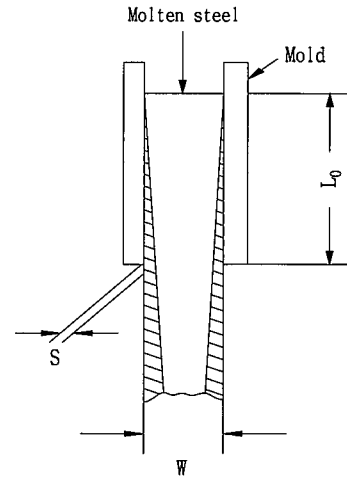


図11 モールド内摩擦抵抗

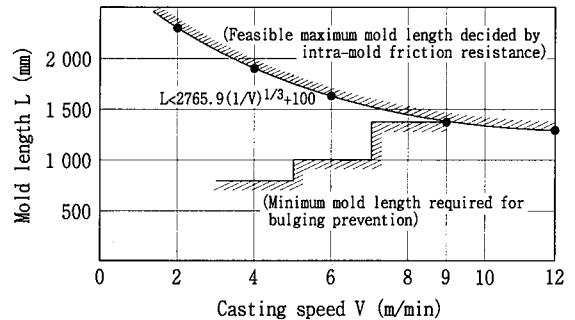


図12 バルジング防止に必要な最小モールド長およびモールド内摩擦抵抗による可能最大モールド長さ

上記の二つの式よりバルジング防止に必要な最小モールド長とモールド内摩擦抵抗による最大モールド長さを図12に示す。この結果より、ビレット連続製造における最大製造速度はモールド長さ制約により規制され、概略速度9.0m/minレベルであると推定される。より詳細な検討のためには、モールド内摩擦抵抗の詳細検討が必要である。

4. 関西ビレットセンターにおける高速製造化改造

4.1 設備改造仕様

新日本製鐵は、関西ビレットセンターにおいてビレット連続製造のストランド当たり生産能力を27t/hから48t/h(寸法130mm×130mm, 速度6m/min相当)へ上げる高速製造化改造を行っており、1999年8月稼働の予定である(表3参照)。

4.2 モールド直下バルジング抑制による最高製造速度の達成

ロングモールド、2段フットロール、モールド直下強冷却で铸片バルジングを抑制した。寸法150mm×150mm, 速度4.6m/minのバルジング解析結果を図13に示す。高速製造の場合にはモールド直下バルジングを抑えるためロングモールドを用いる。モールド長900mmでバルジング歪みを限界歪み0.25%以下に抑えるためにフットロールは2段とした。図14に製造方向の铸片表面温度および凝固シェル厚を示す。モールド直下部を一定表面温度となるように強冷却したため強固なシェルが成長している。図15に铸片寸法と製造温度の関係を示す。同一t/h換算で寸法130mm×130mm, 速度6.0mm/min相当に達する。図16に関西ビレットセンター改造後の設備概略図を示す。

表3 設備改造主仕様

	Before modification	After modification
1. Ladle	120 t	Same
2. Number of strands	6 strands	Same
3. Tundish capacity	16 t	25 t
4. Steel grade	Midium and low C	Same
5. Size, speed	150mm×150mm, 2.6m/min 165mm×165mm, 2.2m/min 185mm×185mm, 1.8m/min	Maximum 150mm×150mm, 4.6m/min 165mm×165mm, 3.8m/min 185mm×185mm, 3.2m/min
6. Mold	800 mm long	NS Hyper Mold 900 mm long + 2 foot rolls
7. Meniscus control	Thermocouple system	Same (γ-ray system/provisinal)
8. Secondary cooling	• 1 200 ℓ /min • 2 zones	• 2 200 ℓ /min • 3 zones
9. Oil-hydraulic shear		Increased cutting speed

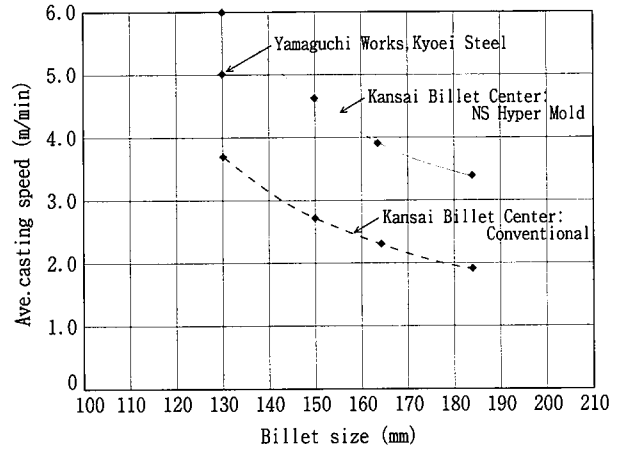


図15 ビレットサイズと铸造速度

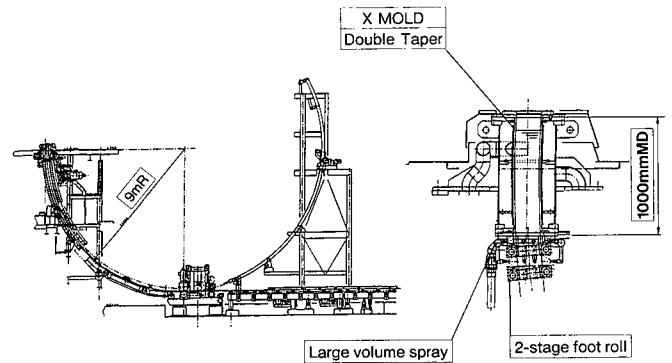


図16 設備改造後の連続铸造機

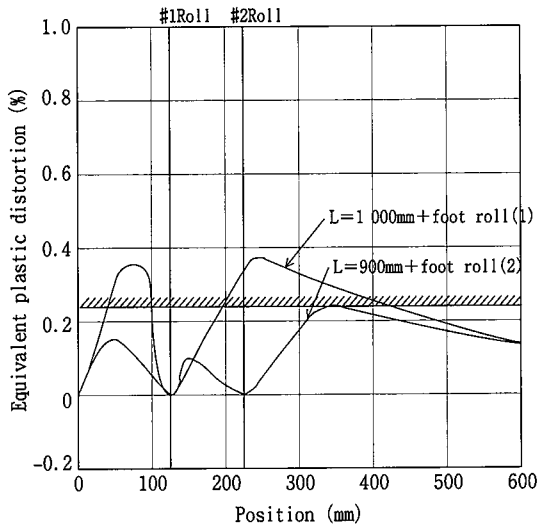


図13 寸法150mm×150mm, 速度4.6m/minモールド直下バルジング

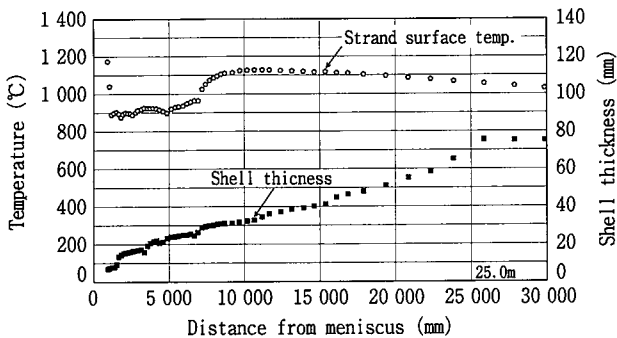


図14 寸法150mm×150mm, 速度4.6m/min二次冷却温度

5. 結 言

- 1) 高速铸造時のオフコーナー割れ、ブレイクアウトの防止のためには、モールドテーパ最適化およびモールド直下バルジングの防止が必要である。
- 2) NSハイパーモールドによりオフコーナー割れ、ブレイクアウトの防止を可能とし、寸法130mm×130mm, 速度5.0m/minを実現した。
- 3) バルジング防止およびモールド内摩擦力によるモールド長の制約条件により可能最大铸造速度は規制され、概略速度9.0m/minレベルが可能高速限界であると推定される。
- 4) 現在寸法150mm×150mm, 速度4.6m/min, 寸法165mm×165mm, 速度3.8m/min, 寸法185mm×185mm, 速度3.2m/min(寸法136mm×136mm, 速度6.0m/min相当)を関西ビレットセンターで設備計画中であり、1999年8月稼働の予定である。

本論文の作成に関し、共英製鋼山口事業所および関西ビレットセンターにご協力頂いたことに対して深く感謝致します。

参考文献

- 1) Sato, T.: High-Speed Casting of Continuous Cast Billet by X Mold. SEAI 1996 Thailand Conference, Vol. 1-6/1, 1996
- 2) Uehara, M.: High-Speed Billet Casting by X Mold at Yamaguchi Works, Kyoei Steel Company. SEAI 1997 Korea Conference, Vol. 2-16/1, 1997
- 3) Brimacombe, J. K. et al.: Formation of Off-Corner Internal Cracks in Continuously-Cast Billet, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol.19, 215-227(1980)
- 4) 木村智明: 第69・70回西山記念技術講座, 特殊連続機. 1980, p.358
- 5) 梅田洋一 ほか: 鉄と鋼, 4, 243(1979)