

高速鋳造安定化のための技術開発

Technology Development for Stabilization of High Speed Continuous Casting

伊藤 陽一 ITO Yoichi JFE スチール スチール研究所 製鋼研究部 主任研究員 (課長)
村井 剛 MURAI Takeshi JFE スチール 製鋼技術部 主任部員 (課長)
三木 祐司 MIKI Yuji JFE スチール スチール研究所 主席研究員・博士 (工学)

要旨

連続鋳造における生産性向上の要求に対して高速鋳造安定化の技術開発が進められてきた。JFE スチール西日本製鉄所倉敷地区第4連続鋳造機において鋳型銅板に埋設された多点熱電対を用いた鋳型下端凝固シェル厚のオンライン計算が試験され、各種ブレイクアウト検知に対する有効性が得られた。また、幅方向均一冷却ノズル、高圧スプレー法などの強二次冷却のための新技術がモデル実験ならびに実機実験を通じて実施された。それらの二次冷却開発が生産性向上と鋳片品質の改善の両立に有効であることを確認した。

Abstract:

High speed continuous casting technology has been developed to improve productivity. The method of real-time calculation of the solidified shell thickness by using multiple thermocouples embedded in the mold copper plates was tested at JFE Steel West Japan Works (Kurashiki) No. 4 continuous caster (CC), and the possibility of detecting various types of breakouts in high-speed casting was demonstrated. In addition, new technologies for intensive secondary cooling, such as uniform cooling nozzles and high-pressure water spray method, were studied through laboratory-scale experiments and plant trials. The results confirmed that the developed secondary cooling technologies are effective for improving both productivity and slab quality.

1. はじめに

新興国の台頭により鋼材生産のグローバル化が進む中、連続鋳造における高品質・高生産性への要求がさらに強まりつつある。高生産性の達成のためには、連続鋳造の鋳造速度を増大させることが有効である。JFE スチールでは高速鋳造技術に対して、積極的に技術開発を進め、0.22 m 厚の倉敷地区第4連続鋳造機、福山地区第6連続鋳造機において一般スラブ連続鋳造機では世界最高となる 3.0 m/min の鋳造速度を達成した^{1,2)}。また、福山地区第6連続鋳造機においては幅 2.1 m、厚み 0.25 m の大断面スラブサイズに対しても高速鋳造技術を推進し、ストランド当りで世界最大スループットの 10 t/min を達成してきた。

しかしながら高速鋳造を安定して達成するためには、①モールド湯面変動抑制、②パウダー巻込み抑制技術^{3,4)}、③高速鋳造時の鋳型/鋳片間潤滑安定化、④鋳型抜熱強化による凝固シェル厚確保、⑤鋳型内での凝固シェル拘束や破断によるブレイクアウト(BO)防止、⑥連続鋳造機内表面割れ、内部割れ防止ならびに冷却能力向上を可能とする二次冷却技術などの技術開発にさらに磨きをかけることが必要とな

る。倉敷地区第4連続鋳造機では上述した課題に対して、モールドパウダー改善による鋳型抜熱増加(14%増)、短辺支持面積拡大による短辺バルジング量減少(30%減)、スライディングノズルによるモールド湯面レベル制御を湯面変動信号の位相差をゼロに近づける帯域微分制御方式を採用することで非定常バルジング起因の湯面変動低減(21%減)を達成し、最大鋳造速度 3.0 m/min の達成率を従来の 5.6 倍まで向上させた⁵⁾。

高速鋳造安定化に向けては前述したように様々な対策ならびに技術開発が必要となるが、本報では多点鋳型熱電対を用いた鋳型直下での凝固シェル厚オンライン測定法による BO 検知技術の開発と連続鋳造機内での割れ防止ならびに凝固完了位置の短縮のための均一強二次冷却技術の開発に特化して報告する。

2. 高速鋳造技術

2.1 多点鋳型熱電対による凝固シェル厚みオンライン測定技術

2.1.1 多点熱電対による凝固シェル厚み測定原理

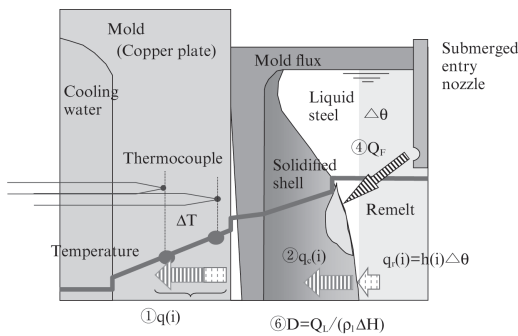
連続鋳造における高速鋳造時の課題の一つに BO 発生による操業阻害があげられる。BO の種類には、①拘束性 BO、

②異物噛み込み性 BO, ③凝固遅れ性 BO などがある。モールドパウダーの潤滑不良や湯面変動により凝固シェルが鋳型銅板に直接焼付くことに起因する拘束性 BO についてはメニスカス付近の鋳型熱電対挙動より検知する方法が糸山ら⁶⁾により提案されており、現在では連続鋳造機で一般的に採用されている。しかしながら高速鋳造技術の推進においては、浸漬ノズルからの吐出流が短辺凝固シェルに衝突する際に凝固シェルを再溶解させる凝固遅れ性 BO やスラグベアや介在物などの異物を噛み込んだ場合にその後の鋳型内での凝固シェルの成長が阻害されることによる異物噛み込み性 BO 発生の危険性も高くなる。対策として鋳型下端までに異常を検知し、鋳造速度の急減速を行う必要があるため、鋳型下端の凝固シェル厚をオンライン測定する方法の確立が望まれてきた。

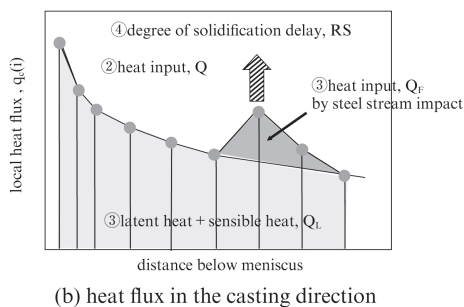
倉敷地区第4連続鋳造機において開発した多点鋳型熱電対による凝固シェル厚測定原理を図1に示す⁷⁾。鋳型銅板に埋設した熱電対で凝固熱流束を測定し、鋳造方向の熱流束プロファイルで、積分して鋳型下端での凝固シェル厚みを算出するモデルであり、ロジックとしては大きく以下の①～⑥の算出過程から構成される。

- ①熱電対温度 (ΔT) から鋳型冷却による局所熱流束 $q(i)$ を算出
- ②凝固シェルへの熱流束 Q の算出 ($q_c(i)$: 鋳型への抜熱量, $q_r(i)$: 平均的な凝固界面流による入熱量)

$$Q = \int q_c(i) dt = \int \{q(i) - q_r(i)\} dt \quad \dots\dots (1)$$



(a) Longitudinal section through steel slab and casting mold



(b) heat flux in the casting direction

図1 オンライン凝固シェル厚計算の概略図

Fig. 1 Schematic diagram of online computing for solidified shell thickness

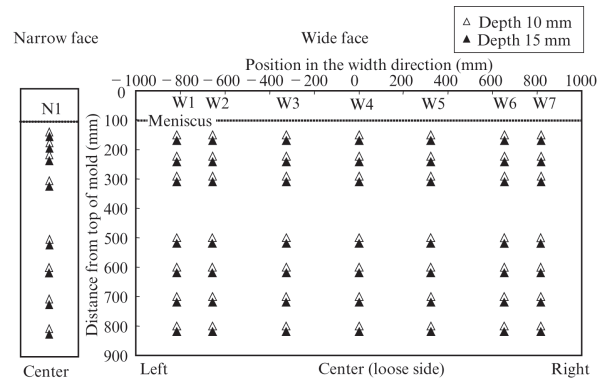


図2 熱電対配置図

Fig. 2 Thermocouple layout

- ③熱流束プロファイル作成と凝固潜熱+シェル顕熱 Q_L と局所的な溶鋼流衝突による入熱 Q_F に分割

$$Q = Q_L + Q_F \quad \dots\dots\dots (2)$$

- ④溶鋼流衝突による入熱 Q_F から溶鋼流衝突の流速 V_F を算出し、熱伝達係数と流速 V_F に対する Isobe の関係式⁸⁾ から凝固遅れ度 RS を計算

$$RS = a \times V_F^{0.8} \Delta\theta + b \quad \dots\dots\dots (3)$$

(a, b : 定数, $\Delta\theta$: 溶鋼過熱度)

- ⑤鋳型下端での凝固シェルのエンタルピー落差 ΔH , 密度 ρ_L の算出
- ⑥鋳型下端での凝固シェル厚 D の算出

$$D = \frac{Q_L \times (1 - RS)}{\rho_L \times \Delta H} \quad \dots\dots\dots (4)$$

図2に示した銅板溶鋼面より深さ位置10, 15 mm に設置したペアの熱電対温度(長辺98本, 短辺16本)から算出される局所熱流束値を基に、鋳型下端の凝固シェル厚みの推算値を0.5 s 間隔でリアルタイム計算可能なモデルを構築した。

2.1.2 オンライン凝固シェル厚み測定結果

図3に低炭素鋼における熱電対による鋳型下端凝固シェル厚測定結果の例を示した。データは凝固シェル厚計算対象のトラッキング区間で鋳造速度や鋳造幅の変化が無かった箇所について鋳造速度1.2~2.5 m/min の範囲のみを抽出したものである。高鋳造速度側で凝固定数が若干低めにシフトする傾向がみられるが、概ね凝固定数 $K=23 \text{ mm/min}^{0.5}$ の下記の関係式で鋳型下端凝固シェル厚が整理できることが確認できた。

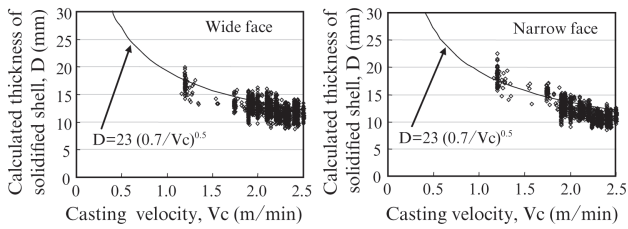


図3 鋳型下端凝固シェル厚と鋳造速度の関係

Fig. 3 Relations between calculated thickness of solidified shell in the exit of a mold and casting velocity (steel grade: low carbon steel, slab width: 980~1650 mm)

$$D = K \times \left(\frac{0.7}{V_c} \right)^{0.5} \dots\dots\dots (5)$$

(D: 鋳型下端シェル厚み, V_c: 鋳造速度)

多点熱電対を用いた計算システムによりリアルタイムに凝固シェル厚みを推算できることを確認でき、さらには凝固遅れ度 RS, 局所熱流束の時間変化率などを常時監視することにより、凝固遅れ性 BO, 噛み込み性 BO などの検知に対する有効性が得られた。

2.2 均一強二次冷却技術

2.2.1 幅方向均一冷却スプレーの開発

前述した連続鋳造鋳型内の技術開発と並んで、鋳型下部の二次冷却帯での鋳片冷却技術の深化が高速鋳造安定化に対して重要となる。JFE スチールでは様々なスプレー開発ならびに二次冷却技術開発を実施してきたが、ここではその一部を紹介する。

図4に新たに開発した幅方向均一冷却スプレーの原理を示す。従来スプレーは高鋳造速度化に伴う水量増大により吹き込まれた空気がスプレー端部に集中して噴射される傾向が強まり、結果としてスプレー端部の冷却が過冷却となることが推定された。これに対して均一冷却スプレーでは、デフレクターをノズルチップ部に配することで空気と水の混合をより活性化させることが可能となり、高水量時にも端部の

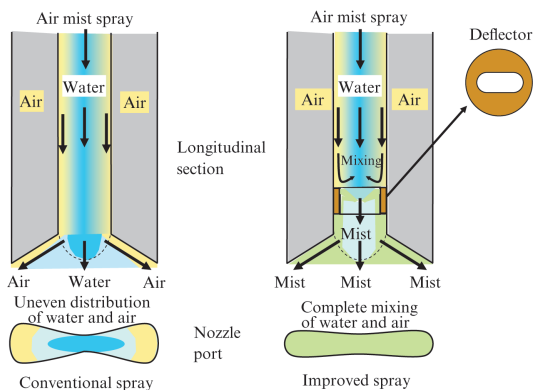


図4 幅方向均一ノズルと従来ノズルの概略図

Fig. 4 Schematic diagram of conventional spray and improved spray

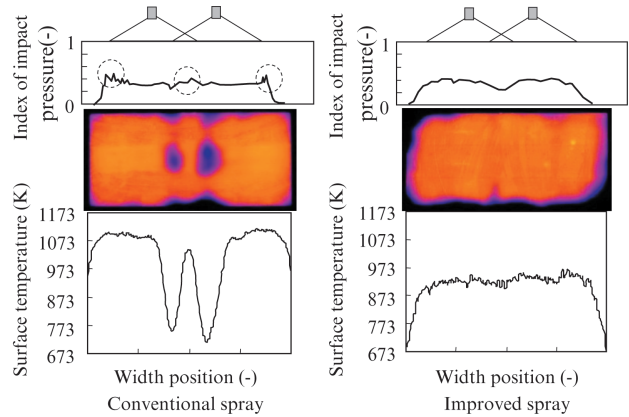


図5 モデル実験による均一冷却性評価

Fig. 5 Evaluation of uniform cooling in laboratory test

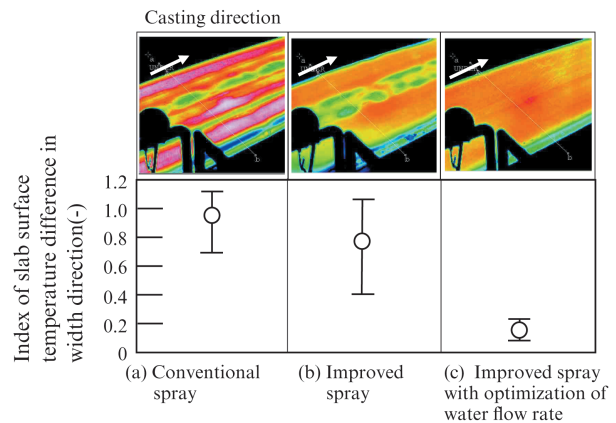


図6 機端位置での幅方向温度差の比較

Fig. 6 Comparison of temperature difference in the width direction at the end position of continuous caster

過冷却を防止できることに特徴がある。

モデル実験装置を用いて本開発ノズルの均一冷却性を評価した例を図5に示す。それより従来スプレーの場合にスプレーラップ部でみられた過冷却が開発ノズルでは解消できていることが確認できた。本モデル実験による評価を各二次冷却帯のノズル配置、水量密度条件に対して実施した後、福山地区第6連続鋳造機での開発ノズルの適用試験を進めた。

図6に福山地区第6連続鋳造機端位置でのスラブ表面温度の幅方向温度差の指標値を(a)従来ノズル、(b)開発ノズル、(c)開発ノズル+二次冷却水量改善の3条件について示した。スラブ幅方向温度差は開発ノズルの適用により大幅に低減し、さらに二次冷却水量を見直した場合に極めて低位となった。上述した幅方向温度差に対応して、(c)の条件では横割れの発生は抑制された。

2.2.2 高圧スプレー法の開発

鋳造速度の向上のためには、二次冷却帯全体を強冷却設備に改造することが有効であるが、莫大な費用が必要となることが課題となる。機長が短い比較的低鋳造速度の連続

鋳造機においては、凝固完了位置の短縮に特に効果が高いセグメントのみの冷却強化を図ることにより、20%以上の鋳造速度の向上を目標とする技術の開発が進められた。

開発にあたり予めモデル実験により冷却能力（熱伝達係数）に及ぼすスプレー冷却の影響因子を調査し^{9,10}、スプレー圧力が冷却能に与える影響が大きいことが図7に示すように確認できた。冷却能力向上の要因としては以下の項目が考えられる。

- ・蒸気膜破壊による伝熱モードの変化
- ・ロール間の冷却水有効到達範囲の向上

水量密度は同一条件でスプレー圧力を0.7→5 MPaまでに増加させた高圧スプレーの場合には、特に900℃での平均熱伝達係数が従来スプレーに対して2.8倍と向上効果が大きい。モデル実験結果を基に倉敷地区第2連続鋳造機のメナスカス下2.5~4.0 m位置に噴射圧力5 MPaの高圧スプレー設備を導入し、実機試験を推進した（図8）。

鋳撃ち法により鋳片表面温度と凝固シェル厚の関係を設定し、凝固伝熱計算により凝固プロフィールを推定した結果を図9に示す。鋳造速度0.9 m/minの条件に対して凝固定数27.4（従来スプレー）→28.6 mm/min^{0.5}（高圧スプレー）の向上を確認でき、高圧スプレー法の適用により鋳造速度1.2 m/minの鋳造速度向上が可能であることを確認した。

また高圧スプレーの熱伝達係数 h は下記に示す衝突圧力

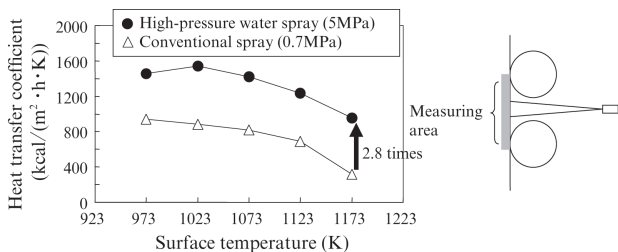


図7 高圧スプレーと従来スプレーの熱伝達係数比較

Fig. 7 Comparison of heat transfer coefficient between conventional spray and high-pressure water spray

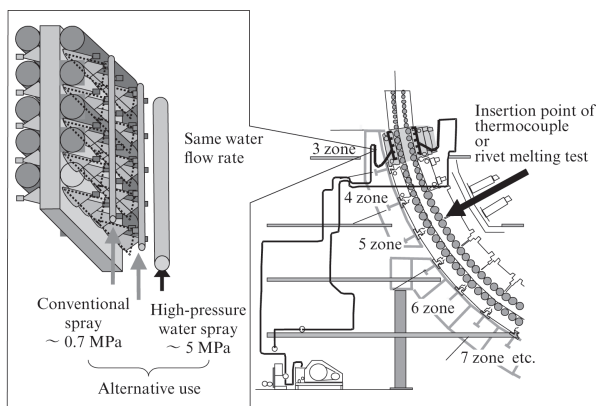


図8 高圧スプレー設備の概略図

Fig. 8 Schematic of experimental equipment for high-pressure water spray

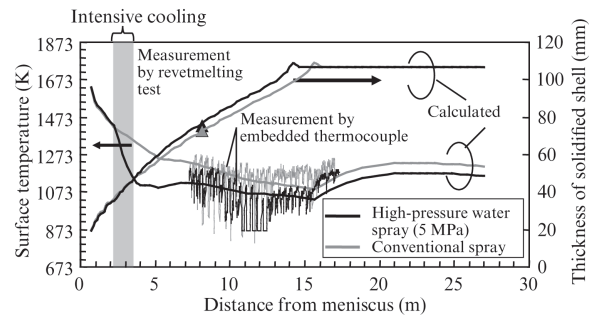


図9 表面温度ならびに凝固シェル厚の実測値と計算値

Fig. 9 Measured and calculated results of surface temperature and solidified shell thickness (casting velocity: 0.9 m/min)

P' に比例することを別途確認しており、鋳造速度低下時のターンダウンを含めた二次冷却水量制御についても高圧ポンプの背圧制御により容易に可能である¹¹。

$$h \propto P' \dots\dots\dots (6)$$

$$P' = 5.64 \times P \times Q_n / H^2 \dots\dots\dots (7)$$

(h :熱伝達係数 (W/(m²·K)), P' :衝突圧力 (MPa), P :ノズル背圧 (MPa), Q_n :ノズル水量 (L/s), H :ノズル/鋳片距離 (cm))

高圧スプレー法を採用した場合にも表面割れ、内部割れ発生等の鋳片品質上の問題のないことを確認できており、本結果をもって高圧スプレー法の実機試験を開始した。

3. おわりに

本稿では、高速鋳造安定化技術において、多点鋳型熱電対による凝固シェル厚みオンライン測定技術、幅方向均一強冷却のための二次冷却技術を紹介し、実機適応により高速鋳造時のBO検知ならびに冷却能力向上への有効性を示した。

さらに、本技術の適用により、製鋼工程におけるエネルギー効率・歩留り改善を実現し、地球環境に優しい鋳造プロセスを確立した。今後、更なる高生産性と高品質を両立可能な鋳造技術の開発に努め、世界最先端のエネルギー効率・環境保全技術を有する製鉄プロセスの確立に寄与していく。

参考文献

- 1) Nanbu, S.; Uehara, H.; Yamasaki, H.; Oshima, K.; Nakajima, S.; Nanba, K. CAMP-ISIJ. 2002, vol. 15, no. 1, p. 167.
- 2) Suzuki, M.; Nakata, M. ISIJ Int. 2007, vol. 41, no. 7, p. 670.
- 3) Watanabe, K.; Tsutsumi, K.; Suzuki, M.; Nakata, M.; Hatori, S.; Suzuki, T.; Omoto, T. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, no. 1, p. 94.
- 4) Tsutsumi, K.; Watanabe, K.; Kubota, J.; Hatori, S.; Suzuki, M.; Nakata, M.; Suzuki, T.; Omoto, T. CAMP-ISIJ. 2008, vol. 21, no. 2, p. 834.
- 5) Hayashi, T.; Matsuoka, K.; Tanaka, Y.; Takeda, T.; Oshima, K.;

- Kameyama, K. CAMP-ISIJ. 2010, vol. 23, no. 2, p. 904.
- 6) Ito, Y.; Iijima, H.; Nabeshima, S.; Kubota, J.; Miki, Y.; Shimazaki, T. CAMP-ISIJ. 2012, vol. 25, no. 2, p. 1004.
- 7) Itoyama, S.; Habu, Y.; Sorimachi, K.; Kawaharada, A.; Yabe, T. Tetsu-to-Hagané. 1982, vol. 68, no. 7, p. 784.
- 8) Isobe, K. CAMP-ISIJ. 2005, vol. 18, no. 4, p. 944.
- 9) Murai, T.; Ito, Y.; Miki, Y.; Abe, M. CAMP-ISIJ. 2005, vol. 18, no. 4, p. 1009.
- 10) Ito, Y.; Murai, T.; Miki, Y.; Mitsuzono, M.; Goto, T. ISIJ Int. 2011, vol. 51, no. 9, p. 1454.
- 11) Wada, T.; Oshimi, M.; Ueda, M. Tetsu-to-Hagané. 1991, vol. 77, no. 9, p. 1450.



伊藤陽一



村井剛



三木祐司