

合同製鐵(株) 姫路製造所におけるブルーム鑄片品質の向上

Improvement in Surface Quality of Continuously Cast Bloom at Himeji Works, Godo Steel, Ltd.

蔵 迫 誠 志 郎^{*1}
Seishiro KURASAKO

阿 南 努^{*2}
Tsutomu ANAN

吉 澤 健 司^{*3}
Kenji YOSHIZAWA

多 村 理^{*4}
Osamu TAMURA

小 形 昌 徳^{*5}
Masanori OGATA

松 長 隆 行^{*6}
Takayuki MATSUNAGA

Abstract

In order to improve surface quality of continuously cast bloom, both the reduction of “air gap” between the mold face and solidifying bloom and the reduction of biased flow in the mold were focused on. Based on solidifying bloom shrinkage calculations, the mold taper was improved to reduce the air gap. The flow pattern in the mold was simulated by water model, and the SEN was improved to “mogul” design. As a result of these measures, the occurrence of the surface cracks was reduced to one tenth of the original. This improvement seems to be the result of even solidification of molten steel in the mold.

1. はじめに

合同製鐵(株) 姫路製造所では主に機械構造用炭素鋼を製造しており、このほかに鍛造用非調質鋼、高張力鋼、肌焼鋼、軌条を製造している。製品は丸棒が主体であり、サイズは径42mm～260mmである。軌条はJIS 22kg用と30kg用を製造している。製造品目の構成をTable 1に示す。

ブルーム鑄片は連続鑄造で製造されており、5種のサイズ(220×250, 250×300, 330×360, 330×450, 370×490mm)がある(Table 2)。主な製造設備は電気炉(70ton)、LF、VDであり、連鑄機

1. Introduction

Godo Steel, Himeji Works mainly manufactures carbon steels for machine structural use and also produces non heat-treated forging type steel, high-tensile steel, case-hardening steel, and rail. The main products are steel bars, which ranges from 42mm to 260mm in diameter. Rail rolls for JIS 22kg use and 30kg use are produced.

Blooms are produced by continuous casting machines. 5 kinds of bloom size are produced

^{*1} 合同製鐵株式会社 姫路製造所 生産部 製鋼工場長 Superintendent, Steel-making Section, Himeji Works, Godo Steel, Ltd.

^{*2} 合同製鐵株式会社 姫路製造所 生産部 製鋼工場 Steel-making Section, Himeji Works, Godo Steel, Ltd.

^{*3} 合同製鐵株式会社 姫路製造所 管理部 生産管理グループ グループリーダー Group Manager, Production Management Group, Himeji Works, Godo Steel, Ltd.

^{*4} 合同製鐵株式会社 姫路製造所 管理部 生産管理グループ マネージャー Manager, Production Management Group, Himeji Works, Godo Steel, Ltd.

^{*5} 技術研究所 第1研究グループ グループマネージャー 理学博士 Dr.Sci., Manager, Shaped Refractories R&D Group, Research Center

^{*6} 湯本工場 技術室 主任部員 Assistant Manager, Technical Section, Yumoto Works

Table 1 Items manufactured at Godo Steel, Himeji Works

Products	Constitution of products
Rail	3%
Rolled steels for general structure	13%
Carbon steel for machine structural use	59%
High-tensile steel	4%
Non heat-treated forging type steel	7%
Case-hardening steel	14%

は2ストランドの湾曲型ブルームである。鑄造速度はモールドサイズに応じて0.5m/min (370×490サイズ)～1.7m/min (220×250サイズ)である。モールド内では電磁力による溶鋼攪拌 (M-EMS)を実施している。

主要製品の機械構造用丸棒は鍛造後に熱処理して切削加工される。最近、加工後の表面品質に対して二次加工メーカーの要求が厳しくなっており、加工後に発見される欠陥が増加している。処理後の欠陥を調べた結果、ブルーム鑄片の表面直下の割れ（以下、表面割れ）が鍛造後に開いていることが分かった。そのためブルーム鑄片の表面品質の向上に取り組んだ¹⁾。

2. 鑄片欠陥の原因

ブルーム鑄片の表面割れはモールド内の溶鋼が不均一に凝固し始める時に発生する。凝固が不均一となる原因の一つは、モールド表面とモールド内の鑄片表面との間にエアギャップが存在する場合である。エアギャップが存在すると溶鋼からの抜熱量が低下し、凝固殻の厚みが均一とならない。

不均一凝固となるもう一つの原因は、浸漬ノズルからの吐出流が不均一な場合である。現在4孔の浸漬ノズルを使用しているが、スライドプレートによる流量制御では絞り注入の影響でノズル内に偏流が発生しやすいため、4方向の吐出流量に

Table 2 Continuous casting machine

Type of caster	Fully curved type
Productivity	85 ton/hr
Casting size	Bloom size (mm); 220×250, 250×300, 330×360, 330×450, 370×490
Number of strands	2
Radius of curvature	16.0m, 23.9m, 47.63m
Incidental facilities	In-mold electromagnetic stirrer (M-EMS)

(220×250, 250×300, 330×360, 330×450, 370×490mm; Table 2). The main production facilities are EAF (70 ton), LF, VD, and curved-type continuous casters with 2 strands. The casting speed ranges from 0.5m/min for the 370×490 size to 1.7m/min for the 220×250 size depending on the mold size. The molds are equipped with an in-mold electromagnetic stirrer (M-EMS).

The bar steels for machine structural steel use, which are the main products, are produced by forging, followed by heat-treatment, and then cutting. Recently, users (second processing makers) have come to demand extremely high surface quality for bar steels. As a result, complaints about surface defects discovered on the bar products are increasing. Through surface defect investigation, we found that they were formed by the opening of sub-surface cracks in the bloom during forging. Therefore we improved the surface quality of the continuously cast bloom¹⁾.

2. Cause of Bloom Defects

Cracking of the surface and sub-surface of the bloom occurs when molten steel in the mold begins to coagulate unevenly. One of the causes

Table 3 Simulation conditions

Mold size	220×250 mm
Type of steel	JIS S45C ([C]=0.45, [Si]=0.25, [Mn]=0.70)
Casting speed	Max. 1.69 m/min Ave 1.50 m/min
Position of meniscus	100mm from upper end of the mold
Mold length	800 mm

偏りが生じて不均一凝固を生じる可能性がある。

そこでブルーム铸片の品質向上のために、モールドのテーパの最適化によるエアギャップの解消と、浸漬ノズル構造の改善による偏流防止を検討した。

3. モールドテーパの最適化

Table 3に示した条件で铸片の収縮量を計算²⁾し、モールドとの間に生じるエアギャップの厚さを推定した。結果をFig. 1に示す。収縮量は

of the uneven coagulation is the presence of “air gap” between the surface of the mold and surface of the solidifying bloom in the mold. Because the air gap reduces heat removal from molten steel in the mold, the thickness of the solidified shell tends to become uneven.

Another cause of uneven coagulation is an unbalanced supply of molten steel from the submerged entry nozzle (SEN) to the mold. The SEN has four outlet ports, and the flow rate for the SEN is controlled by a 3-plate sliding-gate system. Because the sliding-gate throttling causes a biased flow condition in the SEN, there is a possibility that the flow rate from each port varies among the four ports, resulting in uneven coagulation.

Thus, we focused on reducing the air gap by optimizing mold taper and preventing the

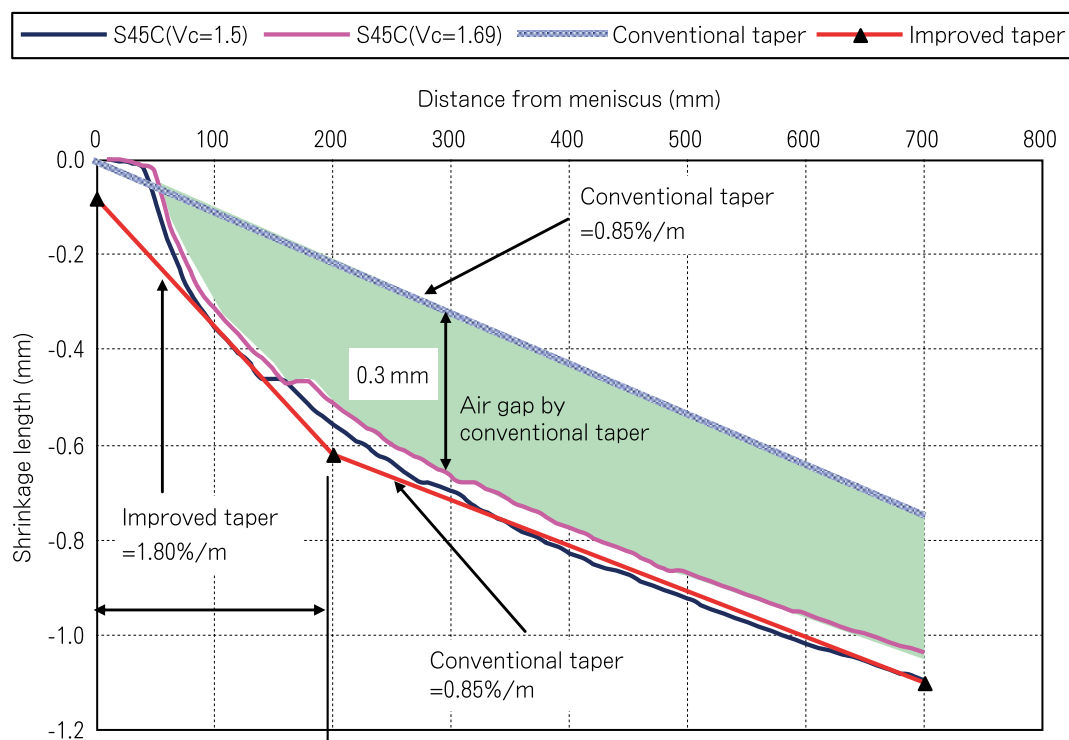


Fig. 1 Calculation results of solidification shrinkage of bloom and improvement in mold taper.

Table 4 Water model experiment conditions

Mold size	220×250 mm
Casting speed (Water flow rate)	1.65 m/min (90 liter/min)
Dip depth	From the surface of the water (=meniscus) 220 mm dips
Slide gate	Three pieces of parallel expressions

製品の種類によって異なるが、従来のテーパー（0.85%/m）のモールドを使用した場合、約0.3mmのエアーギャップが生じる可能性がある。このエアーギャップを減らすために、鋳片の形に適合するようにモールドのテーパー角度を改良した。新しいモールドは、メニスカスから200mmの範囲でテーパーを1.8%/mと大きくし、その下では従来と同じテーパー（0.85%/m）とした2段階構造である。

4. 浸漬ノズル構造の改良

4. 1 実験条件

モールド内の溶鋼流動状態を調査するために、実スケールでの水モデル実験を行った。モールド形状は220×250mmであり、3層式スライドプレートを用いて casting speed 1.65m/min に相当する流量（溶鋼通過量0.65ton/min相当）に制御した（Table 4）。中プレートの摺動方向はモールド長辺と平行である。

浸漬ノズルは上向き角度の吐出孔をもつ4孔品である。プレート式流量制御では絞り部の影響でノズル内に偏流が生じ、4つの吐出流が不均衡になる可能性がある。そこで工程品である内管ストレート形状に加えて、偏流防止対策に効果のある“モーグル型”浸漬ノズル³⁾を実験に用いた。Fig. 2に示すように、このモーグル型ノズルは内管上部に環状の段差を、内管下部にいくつかの流線型突起を配置した構造である。

unbalanced flow condition by improving SEN design.

3. Optimization of Mold Taper

The air gap in the current mold was estimated by comparing the mold taper and solidification shrinkage of the bloom. The shrinkage was calculated for the conditions shown in Table 3²⁾. The calculation results are shown in Fig. 1. Although the solidification shrinkage differs depending on the kind of product, there might be an air gap of 0.3mm in thickness between the mold surface and the bloom surface when the conventional mold taper (0.85%/m) is used. In order to reduce the air gap, the mold taper was improved. The new mold has a taper of 1.8%/m from the meniscus to 200mm depth and taper of 0.85%/m below the 200mm depth.

4. Improvement of SEN

4. 1 Experimental conditions

In order to simulate the flow pattern in the mold, we carried out a full-scale water model experiments. The experimental conditions are shown in Table 4. The mold size was 220×250mm, and flow rate was controlled by 3-plate sliding-gate corresponding to the casting speed of 1.65m/min (steel throughput 0.65 t/min). The middle plate was throttled in the direction parallel to the mold wide face.

The SEN has four upward angled outlet ports. When the flow in the SEN becomes biased by the effect of slide-gate throttling, the flow rate from the four ports becomes unbalanced. In addition to the conventional SEN with straight bore geometry, we tested the “mogul” SEN³⁾

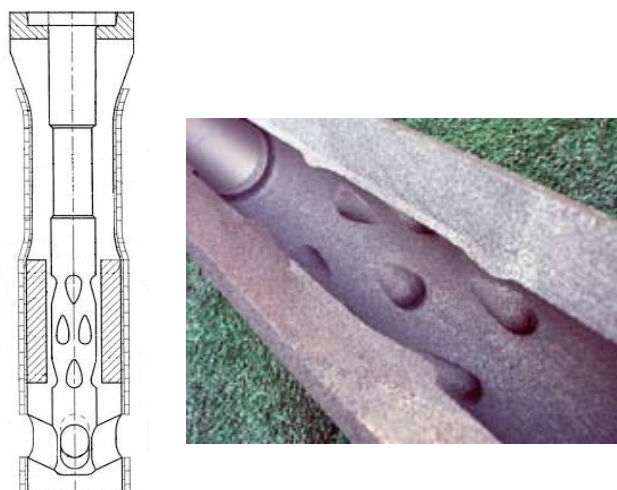


Fig. 2 Shape of the mogul SEN.

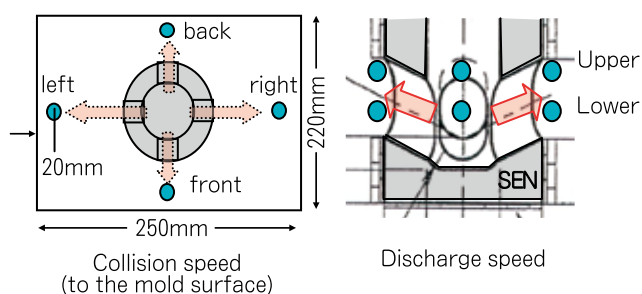


Fig. 3 Measurement positions for flow velocity.

水モデル実験中のモールド内の様子をFig. 4に示す。上向きの吐出孔であるが、十分な深さに浸漬しているためモールド近傍での湯面の盛り上りは観察されない。モールド内の流動状態を定量的に評価するため、吐出孔の流速分布（各吐出孔内の上下2か所）とモールドへの衝突流速の測定を4方向で実施した（Fig. 3）。さらに、吐出孔にポリ袋を当てて単位時間あたりに吐出される水量を測定することで、4つの吐出孔の流量のばらつきを調査した。

4. 2 実験結果

4つのモールド面における衝突流速の比較をFig. 5に示す。従来の内管ストレート型ノズルの場合、衝突流速にかなりのばらつきが認められた。



Fig. 4 Observation of the mold during water modeling.

which has both an annular-step on the upper bore and some spherical convex projections on the lower bore (Fig. 2). This is because the mogul geometry is effective in suppressing the biased flow.

Fig. 4 shows the appearance of the mold during water modeling. Regardless of upward angle of the SEN ports, there was no surge of liquid surface near the mold faces because of sufficient immersed depth. In order to evaluate the flow pattern quantitatively, we measured the flow velocity distribution at the outlet ports and collision flow velocity at the mold face. In addition, we measured water volume discharged from each port by collecting it into the plastic bag attached to the port to check the flow rate balance among the four ports.

4. 2 Experimental results

The collision flow velocities at the four mold faces are shown in Fig. 5. When we used the conventional straight-bore SEN, the collision velocities showed considerable variation among

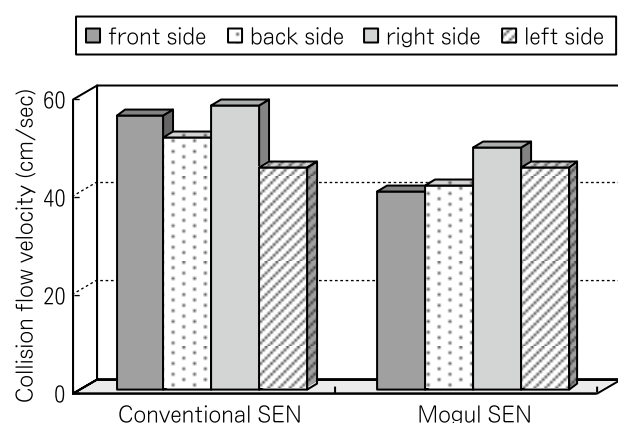


Fig. 5 Comparison of collision flow velocity among the four mold faces.

これに対し、モーグル型ノズルでは衝突流速のばらつきが抑制され、その平均値も内管ストレート品よりも17%低下していた。

吐出孔の流速分布をFig. 6に示す。従来の内管ストレート品では吐出孔の上部は吸い込み流であり、孔の下部から強い流れが出ている。これに対し、モーグル型ノズルでは吐出孔の上部からもあ

the four mold faces. In the case of the mogul SEN, variation in the collision velocity was reduced and the average velocity was lower than that of the conventional one.

Fig. 6 shows the flow velocity distribution at the outlet ports. The conventional SEN showed negative flow velocity (suction flow) at the upper portion of the ports, and the flow velocity was very high at the lower portion. In the case of the mogul SEN, the upper portion of the ports showed positive flow velocity (outward flow), and the flow velocity at the lower portion was lower than that of the conventional one.

The flow rate balance among the four ports is shown in Fig. 7. In the case of conventional straight-bore SEN, there is a considerable variation in the flow rate among the ports. In particular, there was a great difference in the flow rate between the right and the left sides,

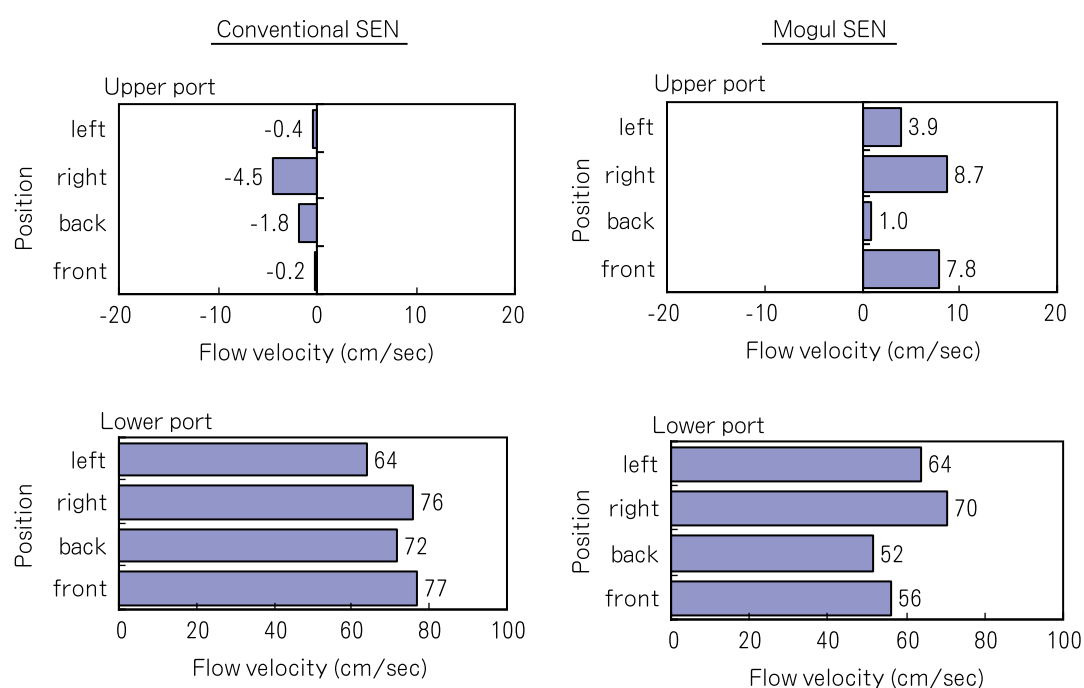


Fig. 6 Comparison of outlet flow velocity at ports.

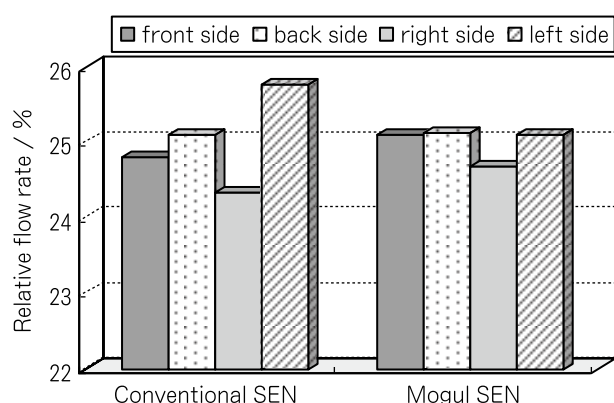


Fig. 7 Comparison of outlet flow rate among the four ports.

る程度流れが出ており、その分、下部からの流れの強さが抑えられている。

4つの吐出孔からの流量のばらつきを調べた結果をFig. 7に示す。従来の内管ストレート型ノズルでは流量のばらつきが大きく、特に右側と左側（すなわちプレートの絞り方向）で流量の違いが大きい。これに対して、モーグル型ノズルでは4つの吐出孔からの流量がほぼ同じである。

こうして、モーグル型浸漬ノズルでは吐出孔内の流速分布のばらつきが減少し、モールドへの衝突流速が減少することが確認できた。また、モーグル型ノズルでは4つの吐出孔からの流量が等しいため、4つのモールド面における衝突流速のばらつきが抑えられた。そのため、モーグル型ノズルを使用することでモールド内の凝固が均一になることが期待できる。

5. 結果

ブルーム鑄片のコーナーに生じた長さ5mm以上の表面割れの数をも測定した結果をTable 5に示す。対策前の状態を100として指数表示した。従来の浸漬ノズルを使用した場合、モールドのテーパの変更によって内部欠陥は57%に低下した。さらにモーグル型浸漬ノズルを導入することで、

Table 5 Change in number of surface cracks on bloom (index)

	Mogul SEN	Conventional SEN
Improved mold taper	11	57
Conventional mold taper	36	100

which corresponds to the plate throttling direction. On the contrary, the mogul SEN showed a balanced flow rate among the ports.

Thus we confirmed that the mogul SEN improves the flow pattern in the mold. First, the biased flow condition within the port was reduced, resulting in a reduced collision flow velocity against the mold. Second, the flow rate variation among the ports was reduced, resulting in a balanced supply of hot molten steel. Therefore the mogul SEN is expected to contribute to the even solidification of molten steel in the mold.

5. Results

The surface quality of the bloom was evaluated by investigating the number of the cracks which appeared on a corner section of the bloom and had a length longer than 5mm. Table 5 shows the improvement in the surface quality of the bloom. The original occurrence of cracking is shown as the standard with an index of 100. When a conventional SEN was used, surface defects were reduced by 57% by optimizing the mold taper. In addition, the defects were reduced by another 11% by using a mogul SEN. These improvements in surface quality seem to be the result of even solidification of molten

欠陥数は当初の11%にまで低下した。こうした鋳片欠陥の減少は、モールドのテーパーの最適化と浸漬ノズル形状の改良によって、凝固殻厚みが均一化されたためと考えられる。

steel in the mold by reducing the air gap and by balancing flow conditions in the mold.

References

- 1) S. Kurasako, K. Yoshizawa, O. Tamura, T. Anan : 6th European Conference on Continuous Casting (2008)
- 2) K. Ogawa: Japan Engineering Network Corporation, Private letter
- 3) M. Nakamura, S. Inoue, T. Horiuchi : Shinagawa Technical Report, **49**, 59 (2006)