

討7

連鑄スラブ内湯流れと鑄片品質について

住友金属工業 中央技術研究所 ○荒木泰治 青木健郎
和歌山製鉄所 池田隆果

1. 緒言

連続鑄造では非金属介在物の生成を防止する目的で浸漬ノズルが積極的に採用されている。浸漬ノズルをタンデイシユ下を使用する場合の鑄片内湯流れはオープンノズルの場合と異なりノズル形状や位置などによって独特な形態をとり得る。したがって、これら湯流れの形態を十分認識した上で、鑄片品質の観点からどのように対処するか、あるいは、どのように湯流れをコントロールするかについて考えなければならぬ点が多い。本報告は水による模型実験の結果から、2. 3の問題となる点を取上げ、実際の鑄片における実態と対比して検討を行なったものである。

2. 流体模型実験法

模型実験においてはその実際のものとの相似条件が重要であるが、熔融状態における鋼の動粘性係数と常温における水のそれとがほぼ等しいことから実寸模型を用いれば Reynolds 数 ($\rho V l / \mu$) と Froude 数 ($\rho V^2 l / g$) を同時に一致させる実験条件が得られる。(ただし、 V は速度、 l は寸法、 μ は動粘性係数) 実験に用いた模型はアクリル製で 113 mm 中、240 mm 中 鑄片の垂直型と湾曲型、および 130 x 1040 mm 垂直型スラブ鑄片である。模型の内面寸法は小倉製鉄所 110 mm 中 鑄片のブレイクアウトシエル内面寸法から補正計算して定めた。実験条件としては 113 mm 中 鑄片の場合はオープンノズル、浸漬ノズル各々について、タンデイシユ内水ヘッドを 60 ~ 250 mm に変化し、240 mm 中では 567 mm で行なった。スラブ鑄片の場合は、オープンノズルは3本に、浸漬ノズルは1本で逆Y型を用いた。その場合、タンデイシユ内ヘッドは300と400 mm、浸漬深さは湯面から 100 ~ 350 mm、ノズル傾斜角度は水平から 15° と 25° の2種をとって実験した。湯流れを判定するためのトレーサは密度の小さい微粉末としてアクリルの粉末を用いたが、オープンノズルの場合は多量の気泡がまきこまれるので、そのまきこまれた気泡を利用した。気泡の場合には浮力の影響を受けて真の湯流れが見えないう点があるが、実際の場合にも空気のみこみがあり、その内の酸素が反応して大型酸化物を生成するから、その酸化物の挙動を見る上には気泡をトレーサとすることも意義がある。

3. オープンノズル注入流による空気のみこみとその気泡の挙動

オープンノズルの場合、ノズルから噴出する注入流が層流であるか、乱流であるかで空気のみこみ機構に相違が認められる。層流注入の場合には空気のみこみは液面と注入流の交線部に於いて生じ、これは表面張力の大小にも関係するが流速を小さくすると空気のみこみはなくなる。乱流注入流の場合には注入流の内部に於いて連続性がなくなり、ばらけた状態で落下する。その場合頂度水中に石を投げ込んだとき、同時に気泡が石の背面についてまきこまれるような機構で空気がまきこまれる。

オープンノズル鑄造の一例を図1に示す。この場合鑄型内ではまきこ

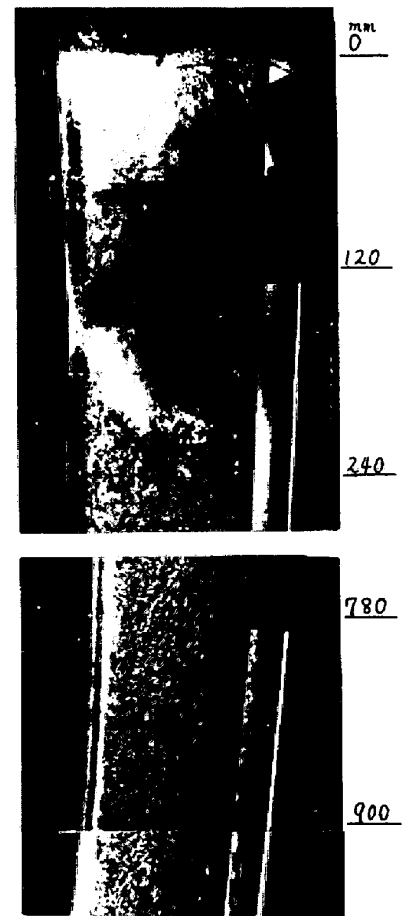


図1 113 mm 中 鑄片オープンノズルによる空気捲込みと気泡の挙動(湾曲型)

み空気とともに激しい攪拌運動がおこる。このうち小さい気泡は引抜の流れに沿って下降する。その場合の気泡の挙動を観察すると垂直型の場合と弯曲型の場合とでは明らかに流れ方を異にしている。すなわち、垂直型では流れは軸対称であるが、弯曲型の場合には流れが天側（斜片曲率の内至側）と地側（同外至側）とで偏りを示している。天側の流れは遅く、地側の流れは速く、地側から天側へ向う流れが全体にみられる。この流れの相違は気泡の内壁面への付着状態にも相違を与え、弯曲型の場合には天側の一定の深さより深い面に気泡の付着がみられる。この気泡の付着開始点は113mm²の場合420mm²であり、240mm²の場合1990mm²であった。その部分の凝固厚さは前者が9.8mm、後者が28.5mmに相当する。これら気泡の挙動は実際の銻込の場合の大型酸化介在物の挙動を代表しているように考えられる。ちなみに小倉製鉄所110mm²中CCでオープンノズルの銻込では大型酸化物が多いことを既に報告しているが、¹⁾その介在物の分布状態を観察すると銻片のごく表面部は健全であるが銻片天側の表面より約10mm²の深さから大型介在物が存在し、²⁾地側半分には非常に少ない。この事実は模型実験で判明した湯流れとの対応をよくあらわしている。なお240mm²のように大型銻片の場合にはこれは改善される方向に向う。また先の報告³⁾で明らかにしたように窒素濃度を1%以下にするとこれら欠陥は完全に防止できる。

4. 湯流れに及ぼす浸漬ノズルの効果

浸漬ノズルをつけた場合の湯流れはオープンノズルの場合に比してすっかり変わってしまう。空気のみまきこみがなくなり、したがって実際銻片でも上記のような大型介在物はなくなる。一方銻型内湯面は非常に静かになり、銻片内湯流れは安定する。一方、噴流の到達深さは増大し、完全混合領域が広がる。このような湯流れの変化の銻片品質に及ぼす影響について、3検討を行なってみる。

4.1 銻型内湯面の動き

浸漬ノズルの使用で湯面の動きが非常に穏やかになるのは空気のみまきこみがなくなったためである。これは銻片の表面肌へ与える影響が大きし、湯面の動きが激しい場合には銻肌に二重肌やスカムのみまきこみ傷が生じやすい。しかし一方湯面が静止状態になると熱放散のため皮張りが生じ、これが表面肌を悪くする原因となる。浸漬ノズル使用の場合、*Oil casting*を行えば後者の理由からかえって肌が悪くなる。したがって浸漬ノズルの場合はスカムの吸収、酸化防止等の目的以外に湯面を断熱保温する目的からも *Powder casting*を採用することが望ましい。流体模型実験によれば湯面の動きはストレート型ノズルを使うと最も穏やかとなる。広中スラブ銻片の場合のように逆Y型ノズルを使用するとノズルの突込み深さと噴流角度が湯面の動きに重要な影響を及ぼすことがわかる。ノズルから出た噴流はノズル傾斜角度にしたがって直進し、銻片端面に衝突する。その後流れは上下ス方向に分れる。上へ向いた流れは端面に沿って上昇し、図2に示すように湯面に波立ちがおこる。ノズル突込み深さは湯面から100~350mm²まで、噴流角度は水平に対して15°と25°に変化して模型実験を行なった。波立ちは突込み深さが浅いほど激しくなり、噴流角度が小さく方が激しくなる。また波立ちが特に激しくなると、波の間に空気をまきこんだり、ノズル出口直上の位置から空気の吸いこみさえ見られる。この流体実験で認められた湯面の波立ちは実際にもオツシレーションマークの乱れとなつてあらわれ、特に端面付近ではマークが波をうった形を作っているのがよくみられる。また空気のみまきこみはパウダーのみまきこみの可能性を示しており、銻片表面のノロかみの原因を作る。（図2のノズル右上部に気泡のみまきこみがみられる。）

4.2 銻片下部における湯流れ

噴流が下部銻片内容鋼につくる乱流領域はオープンノズルで作られるそれよりも深くなる。その理由は浸漬ノズルの場合にはタンデイシユ内ヘッドを直接に受けてノズル流出速度が大になることと、気泡のみまきこみがなくなったために銻型内で上昇気泡の抵抗をうけなれないことによる。この乱流領域（完全混合領域）の比較を表1に示している。

表1 乱流領域の銚込法別比較

113 mm中 *		130×1040スラブ **		
ヘッド	250 ^{mm}	ヘッド	300 ^{mm}	400 ^{mm}
オープン	210	オープン	500	—
浸漬ノズル	450	逆Y	15°	1400
		角度	25°	1500 1620

引抜速度 * 2300^{mm}/min, ** 1000^{mm}/min

銚片下部の湯流れは逆Y型浸漬ノズル使用によつて特徴的な形態をとる。銚片端面に衝突した噴流は上下又方向に分れ、上向き流は前述の通りであるが、下方へ向う流れは端面に沿って深くまで下降流を作る。その深さは表1の条件で1400~1600^{mm}程度に達する。その深さまで達した流れは水平方向に向きを変え、銚片中の中央付近で流れが合体し上昇流となる。この様子は図3に示したようである。ここで興味ある現象として、ここに生じる渦流は必ずしも軸対称でなく、また定常的なものではない。ある週期をもって交互に左右の渦の大きさが変化する。このような流れのパターンと銚片品質との関係は今後さらに明確にすべきいくつかの点を残しているが、この湯流れによつて実際の銚片にあらわれた現象の例として図4に示すようなマクロ偏析バンドを示すことができる。このマクロ組織はこの模型と同じ寸法の銚片から得られたものであるが筈重にも偏析帯がみられる。これがスラブ端面部分にだけ認められることは、この部分が噴流の影響を最も強く受け、流速の早い部分であるためである。また帯状になる理由は上記のような渦流の非定常なオシレーションによることで説明できる。

5. 連々銚における成分混合の解析

連続銚造では生産性向上を目的として、いわゆる連々銚操業が行なわれている。これは一つの取鍋を空にした後引きこづきその鍋の溶鋼を有するタンデイシュへ後続のチヤージの鍋から注入を続ける銚込法である。この場合後鍋の溶鋼組成が前鍋のそれと同一であれば問題ないが、鋼種が変わるときは接合部の組成が前後の中間の値となり、しかも銚片の表面と内部とでも異なる組成となるため用途上に問題がある。この成分混合の条件は今回のテーマである銚片内湯流れと密接な関係がある。いま前鍋のある成分濃度をC₀、後鍋のそれをC₁とし、取鍋からの溶鋼注入流量をV₁(一定)、タンデイシュから一つのストランドへの注入流量をV₂(一定)、タンデイ

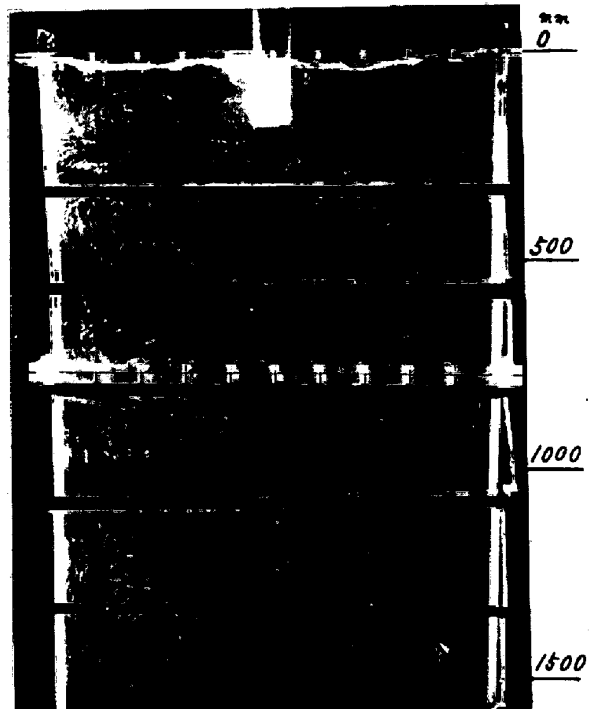


図2 130×1040 銚片内湯流れ

(ヘッド:300, 浸漬深さ:140^{mm})
ノズル角度:15°

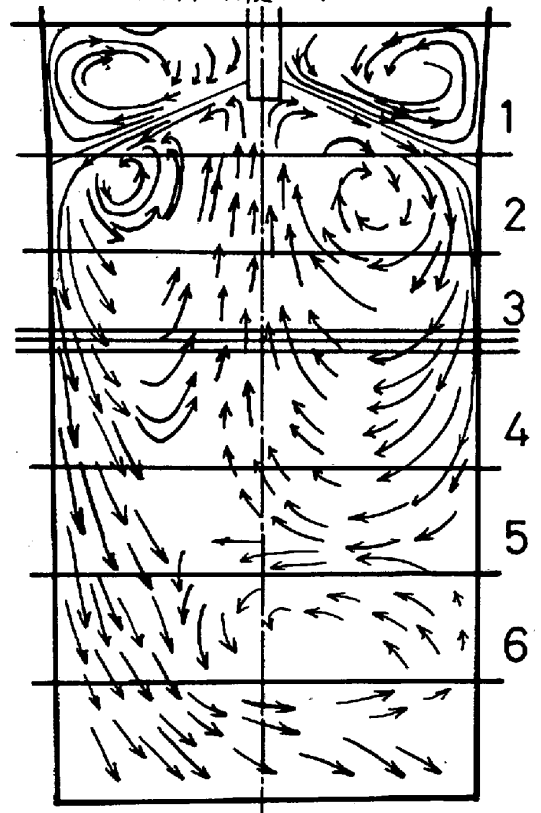


図3 130×1040 銚片内湯流れ模式図

(ヘッド:300, 浸漬深さ:140^{mm})
ノズル角度:25°

シユ内容鋼量を V_0 (一定), そしてストランド数を n とする。
 タンデイシユでは溶鋼は常に完全混合状態にあると仮定し 取
 鋼の注入開始からの時間 t にて濃度 C が得られたとすれば, 物
 質バランス式 (1) 式から (2) 式をうる。

$$V_0 dC = C_1 V_1 dt - C n V_2 dt \quad (1)$$

$$\frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} = \exp\left(-\frac{V_1 t}{V_0}\right) \quad (2)$$

つぎに銑片内容鋼中で溶鋼量として V_2 の範囲が完全混合領域
 だとおいて, その部分の濃度が t 時間後に C であると, 上と同様に物質バランス上 (3) 式をうる。

$$V_2 dC = C V_2 dt - C V_2 dt \quad (3)$$

(2), (3) 式を組合せて C を消去し微分方程式をとけば (4) 式をうる。

$$\frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} = \left[\exp\left(-\frac{V_1 t}{V_0}\right) - \frac{n V_2}{V_0} \exp\left(-\frac{V_1 t}{n V_2}\right) \right] / \left(1 - \frac{n V_2}{V_0}\right) \quad (4)$$

(4) 式を用いて実際の場合の溶鋼の混合状態と比較してみよう。いま前鍋の $Mn = 0.78\%$ (C_0), 後鍋が
 1.49% (C_1) の溶鋼を連続銑込した場合に於いて述べる。連銑機は 1600×190 mm スラブストランド
 で $V_0 = 10$ t, 混合時の引抜速度 0.4 m/min ($V_1 = 1.8$ t/min) の場合, スラブ表面部と中央部の Mn 分
 析値は図5にプロットした通りである。図の横軸は後鍋注入開始時のスラブ位置を基準 (0 m) とし (+)
 側はその後に銑込んだ銑片の長さを示す。この結果, スラブ表面と中央部の分析値のずれは銑片長さで
 約 2.5 m である。表1に示した流体模型実験での完全混合域をスケールアップすればほぼこの値に相当
 する。したがって (4) 式で $V_2 = 5.9$ t (長さで 2.5 m) として銑片内濃度分布を計算すると図5の曲線の
 ようになり, 実際の分析値のパターンを比較的よくあらわすことができる。この計算には種々の仮定が
 はいっているが, 銑込中の鋼片内の湯流れに基づく混合状態がこのように連々銑時の濃度分布を決定す
 る一つの重要な要素となっており得ることがわかる。

6. 結言

連続銑造時における湯流れ状態を水による模型実験から推定し, その湯流れが連銑銑片の品質上どの
 ように関係するかを示した。今後もこのような考えの基礎に立って連続銑造の銑込条件の解析が必要に
 なるものと考えられる。

参考文献

- 1) 荒木: 鉄と鋼
56(1970)4, S 264
- 2) F. W. Irwin &
R. J. Millbourne
: Open Hearth
Proceedings (1970) p.10



図4 スラブ端面側に現われた
偏析バンド 20mm

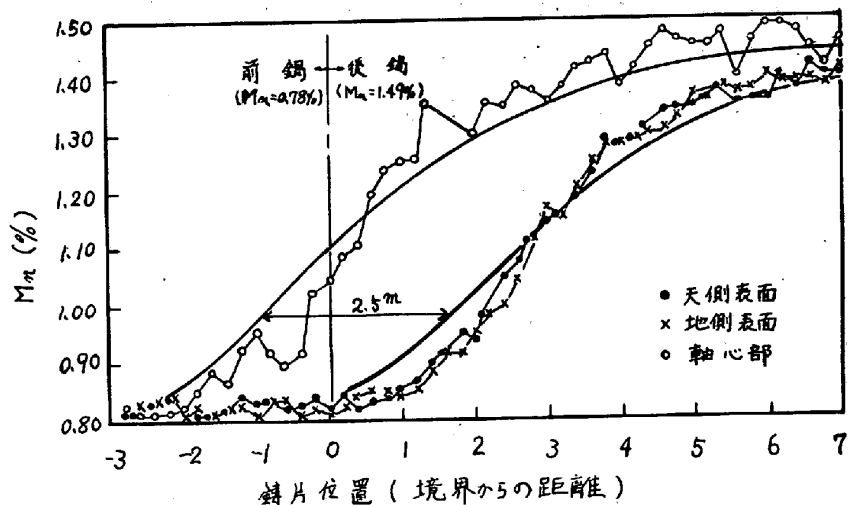


図5 連々銑の境界附近における濃度分布の実測値と計算値
 (190x1600 スラブ弯曲型連銑機の場合)