清浄鋼製造のための溶鋼流動制御

中 西 恭 二*

1. は じ め に

溶鋼を迅速かつ効果的に精錬するためには、鋼浴の攪拌が重要である。このために従来気体吹込みが広く用いられている⁽¹⁾。しかるに近年、電磁気力を利用して溶鋼の流動を制御し清浄鋼を得る新技術が開発されてきた⁽²⁾⁻⁽³⁾。

従来のガス攪拌は主として反応速度を上げるための手段として用いられる。このため乱流場のエネルギー密度の消散速度が key factor となる。すなわち方向性よりスカラー量に着目した要素技術といえる。一方電磁気力を利用した流動は流れの方向をも制御できるもので、従来のガス攪拌よりも質の高い流動制御が可能である。この典型例として最近開発された二つの技術⁽²⁾⁻⁽⁴⁾を紹介する。一つは連続鋳造鋳型内での溶鋼流動制御、今一つは連続鋳造タンディッシュ内での溶鋼流動制御であり、いずれも連続鋳造スラブの清浄化に役立つ技術である。

2. 静磁場を用いた連鋳鋳型内の溶鋼流動制御

連続鋳造スラブの表面および内部に発生する欠陥は、鋳造中の溶鋼の流動現象と密接に関係する。とくに生産性を上げるため鋳造速度を増すとこの種の欠陥は発生しやすくなる。このため鋳片品質を損わずに高速鋳造を実現するには、従来なかった新しい技術を付加する必要がある。連続鋳造において浸漬型注入ノズルによって鋳型内へ供給された溶鋼は、鋳型短辺から成長した凝固シェル面に沿って鋳型深部へと下降する。この際に非金属介在物やガス気泡も溶鋼流とともに鋳型深部へ持込まれ、鋳片内に捕捉される危険性が生じる。一方鋳型内メニスカス部に注目しよう。過度の溶鋼流動によりメニスカス部が波立つと、湯面をおおうモールドパウダーが

溶鋼内へ巻込まれる。この現象も鋳造速度が速いほど顕著となり、鋳片の欠陥を増大させるので好ましくない。以上述べたように、注入ノズルからの溶鋼噴流を如何に制動するかが重要な課題となる。

液体金属の流れと垂直な方向に磁場を作用させると流れを制動する力が働く。その理由は以下のとおりである。すなわち電気伝導性を有する液体金属が磁場中を動くとき渦電流が誘起される。この誘起渦電流は静磁場と相互作用を起こし流れを制動する力が生じるのである。その力は単位体積当たり式(1)で与えられる。

$$F = \sigma [[V \times B] \times B] \quad (1)$$

ここに F は力、 σ は電気伝導度、 V は流速、 B は磁束密度である。静磁場を適用して溶鋼噴流にブレーキを印加する方法は比較的古くから試みられた⁽⁵⁾。この第一世代の電磁ブレーキについて長年にわたりデータが蓄積され、その経験をベースにここに紹介する FC モールド (Flow Control Mould の略)が開発された。

FC モールドは図 1 に示すように二つの領域をカバーする静磁場から成っている。一つは鋳型内溶鋼のメニスカス部の波立ちや激しい界面流を制動するように働く。今一つの磁場は、浸漬ノズルの吐出口から下部に向う流れに作用するように印加される。これによって吐出口からの急速な流れは減速され、鋳型下半分のより広い領域にわたって一様な低流速の流れに変化する。これら二つの磁場は鋳型全幅に作用するように配置されているので、電磁制動力も鋳型全幅にわたり一様に印加される。

井戸川ら⁽²⁾はまず、数値計算により FC モールドの効果を理論的に検討した。すなわち Navier Stokes の運動方程式に式(1)の電磁力を外力として加え、よく知られた $k-\varepsilon$ モデルによる解析を行っている。その際、境界条件として、(1)鋳型壁で溶鋼は滑らない、(2)自由浴面で応力は 0、および(3)すべ

* 1995年度日本金属学会谷川・ハリス賞受賞者・川崎製鉄株式会社専門主監(〒260 千葉市中央区川崎町1)
Flow Control of Molten Steel for the Production of Clean Steel; Kyoji Nakanishi (Kawasaki Steel Corp., Chiba)
Keywords: electro-magnetic force, deoxidation, flow control, clean steel, continuous casting
1995年10月6日受理

図1 FC mold の模式図.

ての境界は電氣的に絶縁されている，などと仮定している．表1は計算条件を示している．铸片長手方向の磁場分布は図2のように設定され，計算を簡単にするため，磁場は铸型の厚み方向の成分(X成分)しか持たないと仮定されている．以上の条件下で井戸川らが求めた流速分布を図3に示す．铸片厚み中心を通り铸型広幅面と平行な面内における流速分布を示している．図3から明らかなように，通常の铸型の場合，浸漬ノズルからの吐出流は短辺面に激しく衝突した後短辺面に沿って下降していく．これと対照的にFCモールドを適用すると短辺面に衝突する吹出流のいきおいは大幅に減速されている．

図4(a)と(b)は磁場の強さを変えた時のメニスカス部での流速および短辺面に沿う下降流速を示しているが，両流速ともFCモールドの適用により減速されている．

井戸川らはFCモールドの効果を数値解析により確認した後実機に適用した．表2が実機FCモールドの基本仕様であ

表1 数値計算条件.

铸型サイズ	$t260\text{ mm} \times w1200\text{ mm} \times h3000\text{ mm}$
浸漬ノズル	2孔下向き 30°
スループット	75 kg/s ($V_c=31\text{ mm/s}$)

図2 数値計算に用いた磁束密度分布.

る．図5は実機メニスカス部で測定した溶鋼流速の変化を示している．これは棒状セラミック体を液面下に浸漬し，その受ける力をセラミック体を支持する板バネに取り付けた歪ゲージで検知して流速に換算されたものである．FCモールドの効果は顕著でメニスカス部の乱流は著しく減衰している．すなわち，流速の平均値では80％に減速し，かつ流速の揺

図3 数値解析による流速の推算.

図4 FC mold による流速の変化. (a) 表面流速, (b) 短辺下降流速

表2 実機 FC モールドの諸元.

マグネットヨーク長	1500 mm
ヨーク間距離	450 mm
最大電圧	250 V
最大電流	1200 A
最大磁束密度	0.28 T

図5 FC モールドによるメニスカス直下流速の変化.

らぎでは30%にまで減衰している. この結果からみて FC モールドはモールドパウダーの巻き込み防止にきわめて有効と推定される. 鋳造後のスラブについて, 介在物の分布を表面から内部に向かって測定すれば介在物が鋳型内の溶鋼プールの中をどの程度の深さまで侵入したのか逆算できる. 図6は

図6 非金属介在物の侵入深さに対する FC mold の効果.

図7 冷延鋼板の表面品質に対する FC mold の効果.

ている. FC モールドを用いることにより介在物侵入深さが半減している. 実際にこうして製造された冷延コイルの表面がどれほど改善されたか調べられ, 図7の結果が得られている. 上で見てきた流れ場の改善により, コイル品質が大幅に向上している.

3. 遠心分離タンディッシュ

連続鋳造では取鍋と鋳型の中に中間容器としてタンディッシュが用いられる. タンディッシュ内での溶鋼流れは激しくスラグ系介在物が巻込まれやすい. とくに取鍋を交換するような非定常操作の場合スラグ系介在物による溶鋼汚染の危険性が増す. このようなスラグ系介在物をタンディッシュ内で迅速に除去するために新しい技術開発が望まれる. さらに取鍋内溶鋼にもともと含まれる脱酸生成物などの非金属介在物をタンディッシュの中で凝集肥大化させタンディッシュ内で分離除去できれば清浄鋼製造のために好ましい. これらの要求を満たすため, 三木ら⁽⁴⁾は遠心分離タンディッシュを開発した. 本法は円筒状タンディッシュ中で溶鋼を回転させるもので, 電磁力を利用する. 回転で生じる遠心力が溶鋼中介在物の分離に役立つ. 本タンディッシュのことを CF タンディッシュ (Centrifugal Flow Tundish の略称) と呼ぶ. 三木ら⁽⁴⁾はパイロット実験および工業規模の実験によりタンディッ

ュ内溶鋼からの介在物の分離効果を調べた。遠心力により介在物が分離されるのは、溶鋼と介在物に密度差があるからである。CF タンディッシュの原理は図 8 のようである。介在物は回転中心に集まり、清浄になった溶鋼が底部外周部に設けた開孔部より流出する。パイロット実験では溶鋼は回転中心上部より供給され、底部コーナー部から排出された。実験条件は表 3 にまとめられている。タンディッシュの容量は 600 kg, 取鍋内溶鋼量は 5 トンである。実験結果は Al 濃度と介在物酸素濃度の関係として図 9 に示されている。介在物

図 8 遠心分離タンディッシュの概念図。

表 3 実験条件。

タンディッシュ容量(kg)	600
取鍋容量(kg)	5000~7000
铸造速度(kg/s)	3.3
回転速度(s ⁻¹)	0.83~1.0

図 9 鋼中介在物酸素濃度(O_{inc})と鋼中 Al 濃度の関係。

酸素濃度は回転により減少し、その効果は Al 濃度が低くても十分にある。図 10 には回転の有りと無しで溶鋼中の介在物の数密度がどのように変化するかを示されている。介在物の数密度は回転時間の経過とともに減少する。720 s の回転処

図 10 溶鋼中の介在物密度におよぼす回転の影響。

表 4 実験条件。

タンディッシュ容量(kg)	10000
取鍋容量(kg)	100000
铸造速度(kg/s)	25
回転速度(s ⁻¹)	0.67~0.83

表 5 溶鋼の化学組成(質量%)。

C	Si	Mn	Al	Cr
0.05	0.4	0.6	0.07	16.3

図 11 連続铸造時に用いられた遠心分離型タンディッシュの概念図。

図12 回転有無による全酸素濃度の変化.

理により介在物は回転をしない時の1/3まで減少する.

三木らはタンディッシュを完全混合槽と仮定して脱酸速度式を式(2)で与えている.

$$(O^0 - O_e) / (O^i - O_e) = 1 / (1 + kt) \quad (2)$$

ここに O^0 は流出口における全酸素濃度, O^i は流入口における全酸素濃度, O_e は平衡酸素濃度, t は平均滞留時間および k は脱酸速度定数である.

式(2)に実験結果を代入して三木らが得た脱酸速度定数 k は $(1.8 \sim 2.0) \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ である. この値はかなり大きい.

すでに著者らが明らかにしたように, 脱酸速度は溶鋼の乱流エネルギー密度の消散速度に強く影響を受ける⁽⁶⁾. 何故かといえば脱酸生成物の凝集体に乱流エネルギー密度が強く関係するからである. 三木らは電磁場で溶鋼が回転運動する際の介在物粒子の合体速度についても検討している. それによれば, 回転流による遠心力で介在物の衝突確率は増大し介在物の分離は回転軸で進む. 従来のタンディッシュに比較してCFタンディッシュにより溶鋼の受ける混合エネルギーが増大し, その結果脱酸速度も増大する.

これらの結果に基づいて実際の連铸設備にCFタンディッシュを設置して脱酸効果が調査された. 表4がその際の実験条件を, また溶鋼の化学成分が表5に示されている. 図11が実機に搭載されたCFタンディッシュの概念図である. タンディッシュは二つの槽から成る. すなわち円筒状のA槽と直方体状のB槽である. 溶鋼はA槽で回転される. 実験結果が図12に示されている. 図はスラブ中の全酸素濃度を回転の有りと無しで比較している. これにより回転により全酸素濃度はほぼ半減している. さらに取鍋交換のような非定常時には図12にみるように回転無しの場合スラグ巻込みにより

酸素濃度が急増するが, 回転付与によりそのような酸素の急増が防止されている. このようにCFタンディッシュは脱酸の促進や, 巻込まれた取鍋スラグの分離除去にきわめて有効である.

4. お わ り に

溶鋼の流動を電磁気力により制御して清浄鋼を得る新技術を紹介した. 電磁気力応用冶金技術は国家プロジェクトとしての共同研究もスタートした. 世界の大学や公立研究所でも電磁気冶金が精力的に研究されており, 今後ますますの発展が期待される.

文 献

- (1) J. K. Brimacombe, K. Nakanishi, P. E. Anagbo and G. G. Richards: Process Dynamics Gas-Liquid, Proceedings of the Elliott Symposium on Chemical Process Metallurgy Edited by P. J. Koros and C. R. St. Pierre, The Iron and Steel Society, Cambridge, Massachusetts, June (1990), 343.
- (2) A. Idogawa, M. Sugizawa, S. Takeuchi, K. Sorimachi and T. Fujii: Materials Science and Engineering, **A173** (1993), 293.
- (3) Y. Miki, T. Fujii, H. Kitaoka, S. Saito and K. Komamura: International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials, ISIJ, Nagoya (1994), 217.
- (4) Y. Miki, N. Bessho, H. Kitaoka, T. Sakuraya, T. Fujii, S. Ogura and M. Kuga: AIME Process Technology Division, Theme Conference on Ladle Metallurgy and Operation, November (1995), to be published.
- (5) J. Nagai, K. Suzuki, S. Kojima and S. Kollberg: Iron Steel Engineer, **61** (1984), 41.
- (6) K. Nakanishi and J. Szekely: Trans. ISIJ, **15** (1975), 522.