



連続鋳造機鋳型内の溶鋼流動制御技術の変遷

高谷 幸司*

Transition of Steel Flow Control Technology in a Continuous Casting Mold

Kouji TAKATANI

Synopsis : It was explained that the purpose of the fluid flow control in a continuous casting mold is to improve the inner or/and surface quality of the products, and characteristics of various flow control method are discussed. Submerged nozzle design, electromagnetic stirrer, electromagnetic brake and soft contact casting are mentioned as flow control technology. Mainly, the explanation was carried out in detail on flow control technology using the electromagnetic force on the transition of past development. It is future important problem to understand the quantitative relationship between the quality of the products and steel flow characteristics in continuous casting mold.

Key words: flow control; continuous caster; electromagnetic force; submerged nozzle.

1. はじめに

日本の製鉄業において連続鋳造機（以後、連鋳機と略す）が、本格的に工業利用されるようになったのは1960年代からで、それから約40年が経過する。当初は生産性が低く、鋳片品質も現在とは比べようがないほどであったが、改善の余地は未だ多くあるものの種々の改良が加えられて、今では高生産性で高品質な鋳片が得られるようになった。通常のスラブ型連鋳機を例に挙げれば、品質の向上を図りつつ、引き抜き速度は1m/分以下から3m/分を超える値にまで引き上げることに成功している。我が国では、1970年代から1980年代にかけて、粗鋼生産に占める連鋳機による製造割合（連鋳化比率）が飛躍的に増加し1980年代半ばで、連鋳化比率は90%を超えるに至り大量生産プロセスとして、ほぼ完成された技術となったのであるが、現在においても高品質および高生産性の追求が行われている。

この間の連鋳機の高生産性を実現した技術の背景には、多くの細かな改善の積み重ねの努力があるが、なかでも鋳型内の溶鋼流動制御技術の貢献は大きく、1980年代から鋳型内の溶鋼の流動制御が意識され、浸漬ノズルの形状最適化や電磁気力による制御技術が盛んに研究・開発され、実用化されてきた。代表的には、1980年に新日本製鐵広畑で鋳型内電磁攪拌²⁾、1981年川崎製鉄水島で電磁ブレーキ³⁾が稼働している。また、1990年日本鋼管福山にて、移動磁界による溶鋼の加減速制御技術⁴⁾が開発され実用に供されている。

このように、連鋳機の高生産・高品質を支えてきた鋳型

内の溶鋼流動制御技術および現在も開発途上の技術に関してその変遷をまとめてみる。

2. 流動制御の目的

現在の連続鋳造機の成功は、浸漬ノズル、鋳型のオシレーションと溶融パウダーの使用によりもたらされたとと言っても過言ではない。これらの技術には各々の得失があり、多くの問題を抱えてはいるが、これらの技術なくしては、現在の連鋳機は成立し得ないと考えられる。これらの技術を用いた連鋳機内の現象は、定性的にFig. 1⁵⁾のように考えられている。

一般的に、鋳型内流動が内部および表面品質に及ぼす影響について、メニスカス直下の水平流速に適正な流速が存在すると考えられている⁶⁾。つまり、流速が速すぎる場合、湯面の乱れが大きくなり、溶融パウダーの巻き込みが発生し、それが鋳片に捕捉されて内部あるいは表面欠陥となる。遅すぎる場合、メニスカス近傍の初期凝固シェルが発達して、そこに気泡や介在物が捕捉されて表面欠陥になると考えられ、適正な流速を保つことが重要と解釈されている。さらには、モールドオシレーションとの関係で、初期凝固シェル先端近傍での流動変動が引き起こす欠陥がFig. 2のように理解⁷⁾されており、微少な湯面の変動も品質を左右する重要な要因である。また、浸漬ノズル内には、多くの場合アルミナ付着によるノズル閉塞を緩和するためにArガスが吹き込まれており、介在物や巻き込まれた溶融パウダーと同様に気泡は、メニスカス直下の流速や浸漬ノズルからの吐出流速に左右されて、種々の内部および表面欠陥

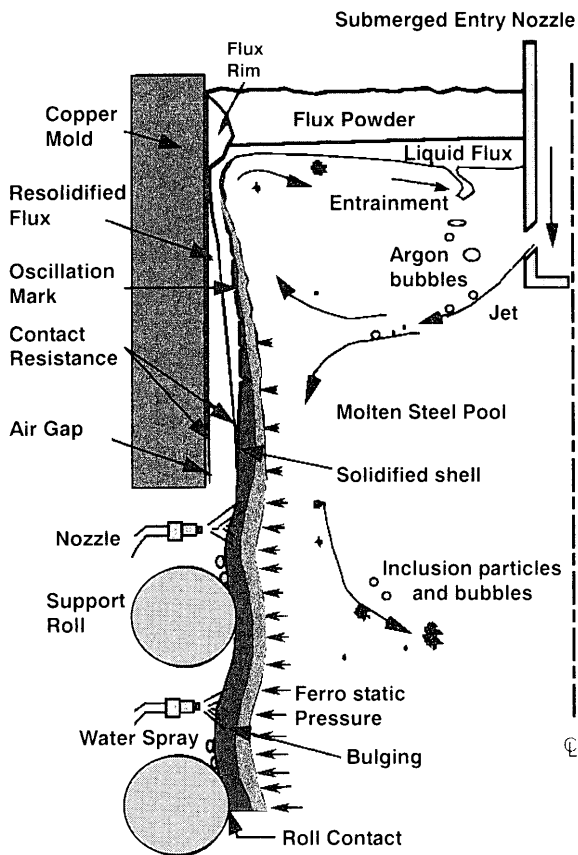


Fig. 1. Schematic of flow phenomena in mold region of continuous casting process.

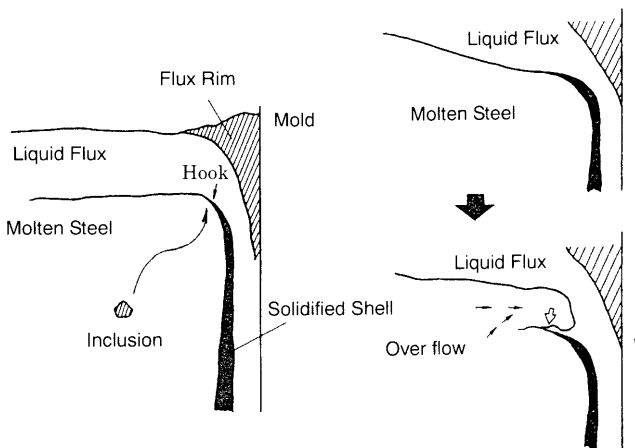


Fig. 2. Schematic representation of meniscus phenomena.

要因となっている⁸⁾。

また、鋳型幅のスケールで生じる流動変動も大きな欠陥発生要因と認識されている。たとえば、水モデル実験にて、ノズル内に吹き込まれたArガスにより流動が左右に大きく振動し、Fig. 3に示すように鋳型内の1/4幅近傍のメニスカス直下の水平流速が左右で同期して振動する現象⁹⁾。あるいは、Fig. 4には浸漬ノズルの底面形状によって、ノズルからの吐出流が時間的に大きく振動する様子¹⁰⁾が示されており、平均流速のみならず時間的な変動についても適正化が要求されている。

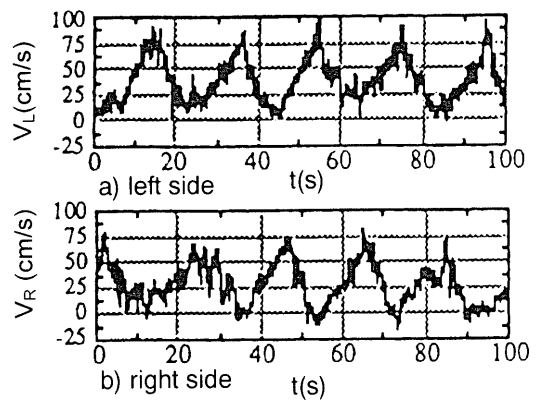


Fig. 3. Surface flow velocity at both sides of immersion nozzle with gas injection into the nozzle.

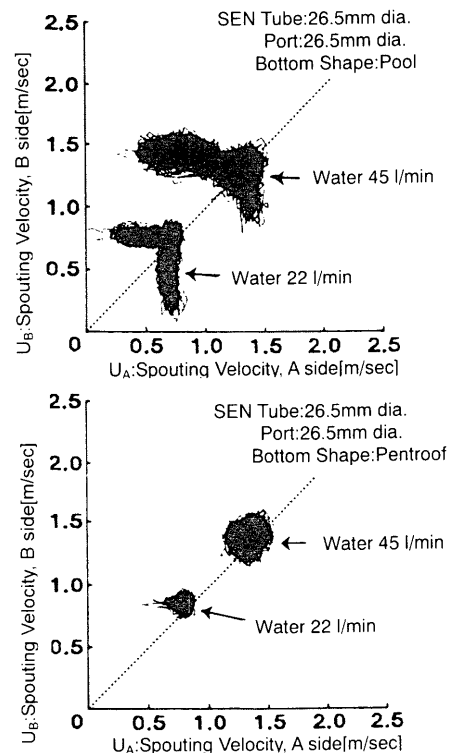
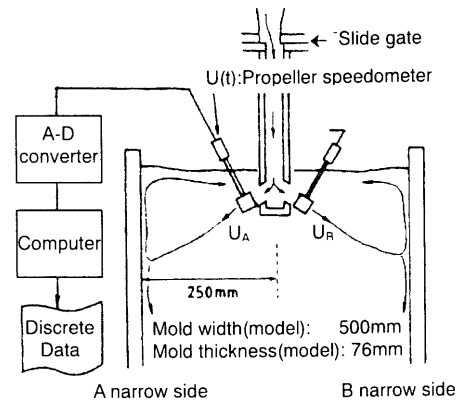


Fig. 4. Effect of bottom shape of immersion nozzle on flow velocity at both exits of immersion nozzle.

鋳型内の溶鋼の流動が、製品の肉質および表面品質に大きく影響することが経験的に知られ、種々の欠陥の観察から、その解釈として鋳型内現象が上記のように理解される

ようになったのである。鋳型内流動制御は、高生産性でかつ高品質な鋳片製造技術を実現するキーワードなのである。

ただし、この様な欠陥発生は、現象が複雑なため未だ十分に定量化されておらず、鋳型内の流動・伝熱現象と種々の欠陥発生との定量的関係の把握が今後の重要な課題であり、特にメニスカス近傍での初期凝固シェルへの気泡や介在物の捕捉や離脱に及ぼす流動・伝熱現象との定量的把握が重要である。

3. 各種流動制御技術

3.1 浸漬ノズル

従来より浸漬ノズルに関し、吐出角度、浸漬深さや内径等の基本的なパラメーターの設計¹¹⁾が行われてきているが、吐出孔数や内部形状を最適に設計して吐出流を制御しようとする多くの試み^{12,13)}は、アルミナ付着によるノズルの初期形状維持が困難なために、継続して使用されている例は希と思われる。ただし、清浄性を要求される鋼種や精錬技術の進歩により、鋼中介在物の量はかなり少なくなりノズル詰まりの問題が軽減されてきており、段差付きや旋回羽根付等の浸漬ノズル内に加工を施したノズルの開発^{14,15)}が継続して行われている。特に、旋回流ノズルは、吐出孔からの流れが均一になる特性を利用して、小断面連続鋳機向けの単一孔のストレートノズルのみならずスラブ連続鋳用の2孔ノズルにも適用され、鋳型内の溶鋼流動の制御に利用¹⁶⁾されつつある。

多くの鋼種においてノズル閉塞は現実的な問題であり、ノズル閉塞防止には種々の抑制方法が報告されているが、今のところArガス吹き込みが最も効果的な手段であり、ほとんどの連続鋳機で実施されている。このArガス吹き込みにより新たな製品欠陥の原因を鋳型内に持ち込んだり、先に示したように吐出流のみならず鋳型内の流動全体に大きく影響する等、決してプラスの効果ばかりではないが、他の有力な代替手段が見いだせないために、この技術に頼らざるを得ないのが現状である。従って、Arガスを用いないノズル閉塞防止手段が実用化された時に、浸漬ノズル形状の最適設計による鋳型内の流動制御技術が大きく進歩することになるであろう。

3.2 電磁気力利用

連続鋳造機の鋳型内溶鋼流動を制御する手段として、古くから電磁気力の利用が盛んに行われてきており、今なお継続して開発が行われている。特に高速鋳造時には何らかの制御手段を使わずに安定に鋳造することは不可能に近く、非接触で流動を制御することのできる電磁気力利用は、他の代替手段がないことから最も注目されてきた技術である。

電磁気力は、供給電流により形成される磁界と流動制御

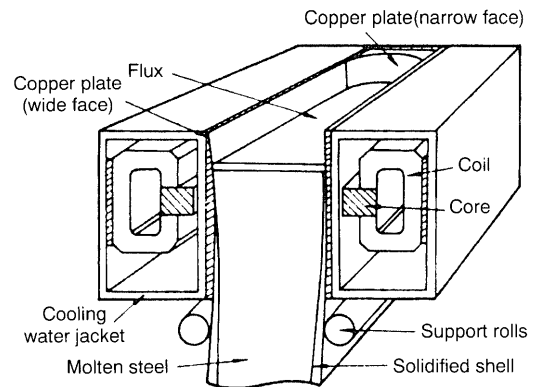


Fig. 5. Electromagnetic stirrer mounted at near meniscus.

の対象である溶湯内に誘導される電流との相互作用により発現する。そして、その磁界は直流および交流電流により形成することができる。交流電流を用いれば、磁界を空間的に固定したり移動したりすることが簡単に実現できるため、利用方法の選択肢は広がる。

以下にこれまでに開発が行われてきた各種流動制御方法を取り上げるが、大きくは、直流固定磁界による制動力、交流移動磁界による回転あるいはリニア駆動力、および交流固定磁界による磁気圧力の利用に分類される。具体的な利用として、電磁ブレーキ、電磁攪拌が工業的に広く利用されている。また、鋳片の外表面の性状改善を期待して、軟接触鋳造技術の開発が行われている。

3.2.1 電磁攪拌

連続鋳機における電磁攪拌は、小断面連続鋳機でのストランド電磁攪拌による等軸晶制御¹⁷⁾に始まり、現在では、スラブ型連続鋳機のメニスカス近傍の水平攪拌による表面性状の向上を目的として、実用に供されている¹⁸⁾。

小断面連続鋳機では鋳型内、ストランド内および凝固末期というように各部位に電磁攪拌が設置され、現在でも多くのマシンで稼働している。鋳型内の電磁攪拌は、小断面連続鋳機では鋳型サイズの制約から単一孔のストレートノズルを使うことが多く、メニスカス部の温度低下が問題となるため、電磁攪拌によりノズルからの直進流を和らげ、メニスカス部への着熱を促進することを目的に設置される。また、同時に等軸晶を多く生成させることに大きな効果を発揮する。スラブ型連続鋳機でもこの目的のために、電磁攪拌が使用されることが多く、厚板向けの連続鋳造機の中心偏析対策として頻りに利用されている¹⁹⁾。

また、Fig. 5に示すようにメニスカス部にコイルを設置し幅方向に水平攪拌することで、表面品質を向上することが報告されている。この水平攪拌は、冒頭で述べたように、1980年に新日本製鐵の広畑で、低炭素弱脱酸鋼の表面近傍での気泡生成の抑制に利用²⁾されたのが最初で、その後、薄板向けスラブの表層部欠陥の低減に効果を発揮する¹⁸⁾ことから再度見直されるようになった。このメニスカス部の溶鋼流動は、Fig. 6に示すように浸漬ノズルからの吐出流

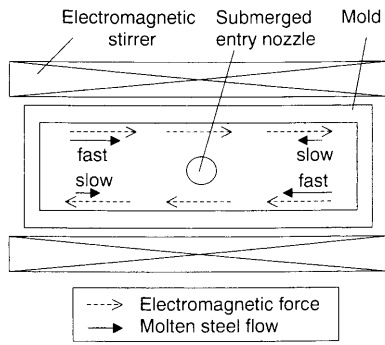


Fig. 6. Schematic view of molten steel flow at meniscus with electromagnetic stirrer.

の短辺反転流で基本的な流れが形成されており、これに水平方向の旋回を加えると短辺からノズルへと向かう流れを強める側と弱める側ができるために、非対称な流れを形成する。従って、引き抜き速度や鋳型幅に応じてノズル吐出角度との組み合わせで磁場を適切に設計する必要がある²⁰⁾。ただし、最近では、数値解析技術の進展が目覚ましく、3次元的な磁場分布や時間的変動も含めた流体解析がFig. 7に示すように可能となってきており²¹⁾、十分とは言えないが、数値解析技術を適切に利用すれば、多くの有益な設計情報が得られる。浸漬ノズルからの吐出流に乗って

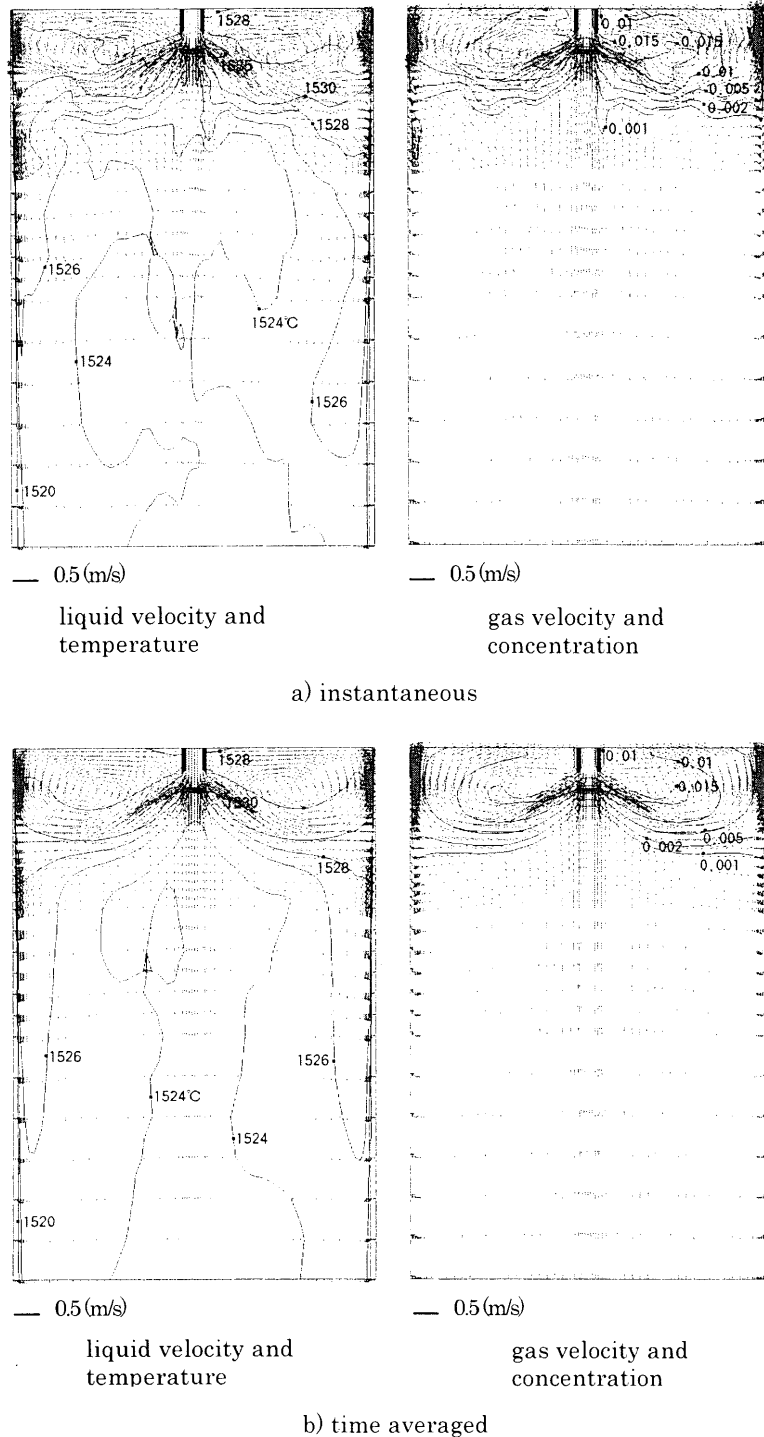


Fig. 7. Computational results according to the mathematical model considering various phenomena.

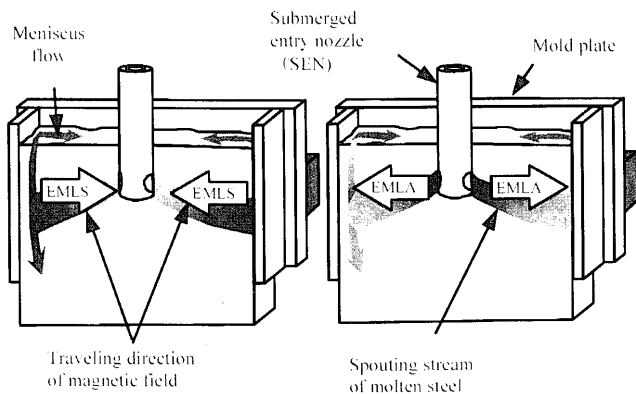


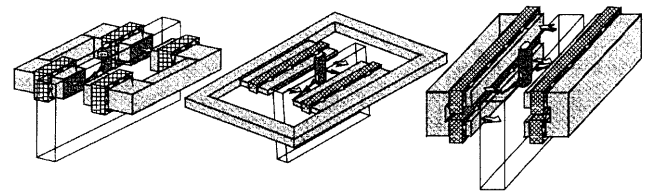
Fig. 8. Electromagnetic force direction imposed upon molten steel by EMLS and EMLA.

鋳片内部へ侵入する気泡や介在物の捕捉については、数値解析により定量的な評価がほぼ可能^{22,23)}となっているが、メニスカス近傍の溶鋼流動が激しい部位での凝固シェルへの捕捉については、研究がなされているものの²⁴⁾、その定量化は十分とはいえず、また、計算精度の面からは、凝固シェル近傍に多くの解析格子が必要で計算負荷がかなり大きくなるため、定量的な解析ができていないのが現状である。

次に行われた移動磁界による鋳型内の溶鋼制御技術は、Fig. 8に示すように、浸漬ノズルからの吐出流に移動磁界を印加し、吐出流を加速(Electromagnetic Level Accelerator: EMLA)あるいは、減速(Electromagnetic Level Stabilizer: EMLS)する加減速制御方法²⁵⁾である。この加減速の適正な磁場印加は、F値と呼ばれる湯面の活性化状態の指標²⁵⁾を適正に制御するように行われる。加減速制御の効果としては、主にF値制御による溶融パウダーの巻き込み防止であるが、メニスカス流速を適正に保つことにより、初期凝固シェルへの気泡や介在物の捕捉を低減することも可能であると報告されており、メニスカス近傍の流動制御を行うことによって表面性状を改善できるのは、メニスカス部の水平電磁攪拌と同様である。

3.2.2 電磁ブレーキ

電磁ブレーキは、浸漬ノズルからの吐出流を減速し、流れを穏やかにする目的で、開発が行われ³⁾、開発当初は、Fig. 9²⁶⁾に示すように吐出孔の出口直後の吐出流の主流に磁場印加するように磁石位置を設定していた。しかしこのような配置では、磁場強度や吐出流量によっては、流れが大きく変化し安定性を欠くことから、磁場を鋳型幅の全域に印加する方法が試みられた。初期の型式を第一世代、鋳型幅全域に印加するものを第二世代と呼んで区別している。そして、第二世代においても、Fig. 9に示すように、上下2段に印加するもの²⁷⁾と一段に印加する方式²⁸⁾がある。特に、上下2段のものは、ノズルからの吐出流に強い磁場を印加しておらず、吐出流が短片にまで到達するような磁場分布となっており、下降流とメニスカス反転流に電



a) First generation type b) Second generation type

Fig. 9. Schematic views of first and second generation electromagnetic brake.

磁力が制動するように配置されている。また、一段の場合は、浸漬ノズルとの位置関係によって大きく鋳型内流動が変化すると報告²⁹⁾されており、制御特性の自由度が高い反面、装置設計には注意を払う必要があると考えられる。

この電磁ブレーキも電磁攪拌と同様に、内質および表面性状の改善効果が報告³⁰⁾されているが、電磁ブレーキと電磁攪拌とは流動制御作用がかなり異なり、気泡や介在物の運動に与える影響にも差があると考えられる。つまり、電磁攪拌による電磁力は、外部から印加した磁場とその磁場変動により誘起された電流との作用により発生するため、溶鋼の速度場にほとんど関係なく作用するのに対し、電磁ブレーキでは、外部から印加された磁場と溶鋼の流動に起因して誘導される電流との相互作用により電磁力が発生する。電磁攪拌は能動的であり、電磁ブレーキは受動的な制御特性を有するのである。従って、電磁ブレーキは流動の乱流変動にも敏感に制動力が作用するが、電磁攪拌では乱流変動とは関係なく駆動力が働くことになる。その結果、平均的な速度が同じでも、電磁攪拌で流動制御した場合は、電磁ブレーキに比較して速度変動が大きく、気泡や介在物の運動に及ぼす影響や凝固シェル近傍での気泡や介在物の捕捉に及ぼす影響も異なると考えられるのである。磁場の効果も含めて、鋳型内の流動・伝熱現象と種々の欠陥発生との定量的関係の把握が重要な課題である。

本題から少しはずれるが、電磁ブレーキの先進的な利用を次に紹介しておく。それは、Fig. 10に示す電磁ブレーキの流動抑制機能を巧みに利用した複層鋼板を製造する連鋳機³¹⁾である。これは、2本の給湯ノズルを用いて、内外層を形成する種類の異なる2種類の鋼種を供給し、幅方向に均一な電磁ブレーキを印加してその両者が鋳型内で混合しないように対流による混合を抑制している。製造された鋳片は、表層部と内層部とがきれいに分離されており、電磁ブレーキの制動効果をうまく利用した高度な流動制御技術である。但し、異なる溶鋼の微妙な密度差による対流の抑制には限界が存在し、選択できる鋼種には制限がある。また、浸漬ノズルが2本必要で装置の構造や制御系が複雑であり、実用化には至っていない。また、これとは異なる利用方法であるが、異鋼種を連続的に切り替える際に、静磁場を印加し混合長を短くすることが可能となっており³²⁾、電磁ブレーキの新しい流動制御機能が追加されることと

なった。

3.2.3 軟接触鋳造

次に、次世代技術として開発が進められている軟接触鋳造技術を紹介する。アルミニウムの分野で、モールドを用いないで鏡面状の表面を持つ鋳片製造を可能とした電磁鋳造 (Electromagnetic Casting: EMC) の開発³³⁾は、大きな驚きであり刺激となったが、それを鉄に応用しようとすると、生産性 (現在の生産速度が非常に高い) と物性上の制約 (密度が大きい割に熱伝導度が小さい) からモールドレスの鋳造が実現不可能なことはすぐに理解された。しかし、同じくアルミニウムの分野で CREM プロセスと呼ばれる鋳型の外部から磁場印加³⁴⁾することにより電磁鋳造と同等の表面性状が得られることが報告されたのを契機に、この技術に着目して鉄の分野への応用が「軟接触鋳造」として提案され³⁵⁾、その後、1995年から日本の国家プロジェクトの主なテーマとして研究が行われてきた³⁶⁾。

前述した電磁ブレーキや電磁攪拌技術は、鋳型内で凝固シェルが生成するときモールドのオシレーションに起因

して鋳片の外表面に生成する表面凹凸 (オシレーションマーク) の軽減にはほとんど効果がないのに対し、この軟接触鋳造技術は、このオシレーションマークを軽減することが目的で、Fig.11³⁷⁾に示す交流磁界が発生するピンチ力 F (溶湯を内部に押し込もうとする力) とジュール発熱による緩冷却効果により実現しようとするものである。開発当初は、アルミニウムと同様に商用周波数レベルの低周波交流磁界からスタートした。低周波数であれば、磁場の浸透深さが深いため、鋳型にスリットを設けなくても磁場を溶湯にまで到達させることが可能で、装置構造が簡単となる。しかし、鋳造の安定性やさらなる効果を得るために高周波数への拡張が進んでいる^{38,39)}。そして、鋳型のオシレーションの代替や補助的機能を期待して、Fig.12に示すような間歇的な磁場印加方式も提案されている。また、鋳型にスリットを設けた場合、構造上の問題を克服する必要があるが、Fig.13に示すような鋳型強度を確保するための構造設計が検討されている^{40,41)}。

現在、このナショナルプロジェクトの成果を反映した商用連鋳機の報告はなく、オシレーションマークの低減のみ

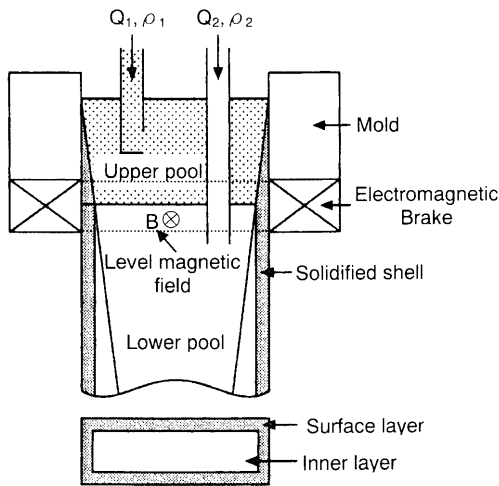


Fig. 10. Schematic illustration of continuous caster for clad slab with electromagnetic brake.

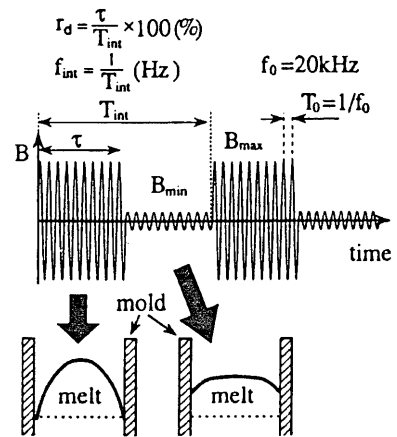


Fig. 12. Wave pattern of intermittent high frequency magnetic field and shape variation of melt.

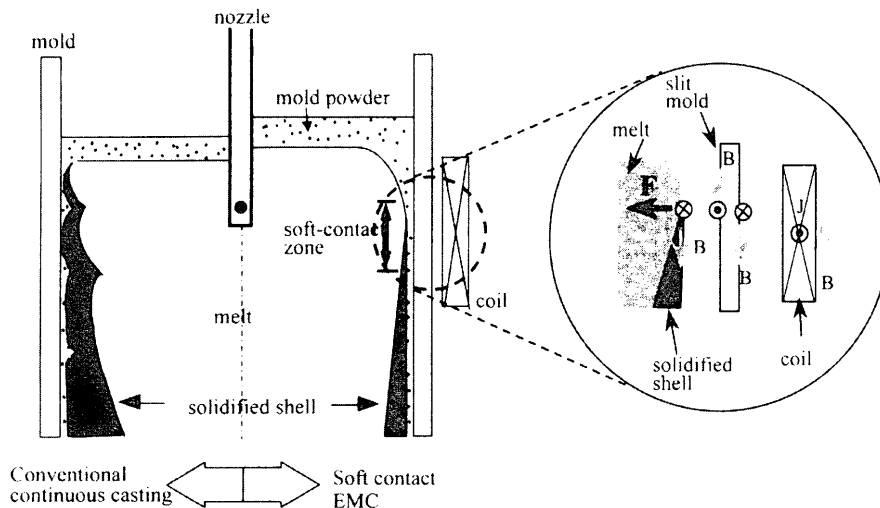


Fig. 11. Schematic representation in the mold of conventional and electromagnetic continuous casting of steel.

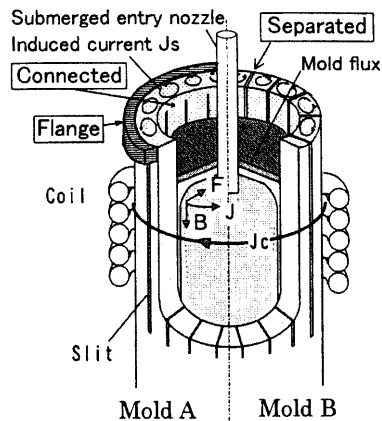


Fig. 13. Schematic view of conventional and improved mold with slits.

ならず、先に示した種々の欠陥の抑制を同時に成立させる必要があり、商用化への道のりは未だ半ばである。

4. まとめ

電磁攪拌と電磁ブレーキは、その基本的な動作として、電磁攪拌は能動的で流動促進作用、電磁ブレーキは受動的で流動抑制作用を特徴とするが、両者ともに近年の連続鋳造設備の多くに設置され、高生産性かつ高品質の鋳片製造に効果を発揮している。その選択は状況次第であるが、その動作特性から考えて、薄スラブマシンに代表されるより高速な連続鋳造の実現には電磁ブレーキ、表面品質が問題となる比較的低速なマシンにはメニスカス電磁攪拌の採用が適切な選択と考えられる。また、浸漬ノズルの形状についても、今なお多くの改善が継続されており、ノズル閉塞防止技術と併せて今後の進展が期待される。さらに、今後の技術として軟接触鋳造の商用化に期待がかかるものの解決すべき課題は多い。

適切な流動制御を行うには、磁場の効果を含めて、鋳型内の流動・伝熱現象と鋳片に発生する種々の欠陥との定量的関係のさらなる解明が必要である。複雑な現象の解明と新たなアイデアで、更なる高生産性かつ高品質な鋳片製造技術が確立されることを願ってやまない。

文 献

- 1) 王寺睦満：第153・154回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1994)，3.
- 2) E.Takeuchi, H.Fujii, T.Ohashi, H.Tanno, S.Takao, K.Furugaki and H.Kitamura: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 1615.
- 3) J.Nagai, K.Suzuki, S.Kojima and S.Kollberg: *Iron Steel Eng.*, May (1984), 41.
- 4) J.Kubota, K.Okimoto, A.Shroyama, T.Masaoka and T.Teshima: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 256.
- 5) B.G.Thomas: 59th Electric Furnace Conf., Iron & Steel Soc., Warrendale, (2001), 3.
- 6) S.Watanabe, S.Kawasaki, M.Aoki, Y.Onoue, T.Sato and M.Takeuchi: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 255.
- 7) 戸崎泰之：第153・154回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1994)，169.
- 8) 笠井宣文：鋳型内溶鋼流動と介在物の動的挙動，日本鉄鋼協会編，東京，(2002)，243.
- 9) K.Tozawa, A.Idogawa, H.Nakato, K.Sorimachi: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 604.
- 10) J.Kubota, K.Ozawa, S.Kuwano, Y.Yamaoka and M.Suzuki: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 1245.
- 11) H.Kimura, A.Uehara, M.Tanaka, N.Iwasaki and N.Tsutsumi: *CAMP-ISIJ*, **3** (1990), 1106.
- 12) N.Bessho, R.Yoda, H.Yamasaki, T.Fujii, T.Nozaki and S.Takatori: *ISIJ Int.*, **31** (1991), 40.
- 13) T.Saito, H.Yamazaki, T.Nozaki, S.Hiwasa and Y.Oguchi: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 299.
- 14) T.Tokunami, Y.Onoue, K.Matsuo, H.Tai, M.Morishita, H.Annaka and K.Ayata: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 606.
- 15) S.Yokoya, M.Matsuki, Y.Asako and S.Hara, J.Szekely: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 1159.
- 16) Y.Tsukaguchi, T.Watanabe, S.Yokoya, S.Hara, K.Marukawa and K.Nonobe: *CAMP-ISIJ*, **15** (2002), 839.
- 17) H.S.Mar: *Iron Steel Int.*, **10** (1979), 29.
- 18) A.Kiyose, K.Miyazawa, A.Fukuda, Y.Otani, and J.Nakajima: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1195.
- 19) 戸崎泰之：第153・154回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1994)，182.
- 20) M.Morishita, H.Mori, R.Suzuki, K.Miyake, T.Nakaoka and Y.Hosokawa: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 7.
- 21) K.Takatani: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 915.
- 22) K.Takatani: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 602.
- 23) H.Tanaka, A.Imamura and R.Nishihara: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1464.
- 24) 瀬々昌文，向井楠宏：鋳型内溶鋼流動と介在物の動的挙動，日本鉄鋼協会編，東京，(2002)，3.
- 25) J.Kubota, N.Kubo, T.Ishii, M.Suzuki, N.Aramaki and R.Nishimachi: *NKK Tech. Rev.*, No. 85, (2001), 1.
- 26) A.Lehman, G.Tallbäck, S.Kollberg and H.Hackl: Int. Sympo. on EPM, 1994, ISIJ, Tokyo, (1994), 372.
- 27) A.Idogawa, H.Tozawa, S.Takeuchi, K.Sorimachi, T.Sakuraya, M.Sugisawa and S.Moriwaki: *CAMP-ISIJ*, **5** (1992), 36.
- 28) E.Takeuchi, H.Tanaka, K.Okobira, K.Wada and H.Kajioka: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 24.
- 29) K.H.Moon, H.K.Shin, B.J.Kim, J.Y.Chung, Y.S.Hwang and J.K.Yoon: *ISIJ Int.*, **36** (1996), s201.
- 30) A.Idogawa, H.Tozawa, S.Takeuchi, K.Sorimachi, M.Sugisawa and J.Hasunuma: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 618.
- 31) E.Takeuchi, H.Tanaka and H.Kajioka: Int. Sympo. on EPM, 1994, ISIJ, Tokyo, (1994), 365.
- 32) H.Harada, E.Takeuchi, M.Zeze, T.Ishii, A.Uehara and T.Okazaki: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 205.
- 33) Z.N.Getselev; U.S. Patent, No. 3467166 (1969).
- 34) Ch.Vives, B.Forest and J.P.Riquet: French Patent, No. 841470 (1986).
- 35) 浅井滋生：第129・130回西山記念技術講座，日本鉄鋼協会編，東京，(1989)，51.
- 36) K.Ayata, K.Miyazawa, H.Uesugi, E.Takeuchi, H.Mori and H.Tozawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 49.
- 37) J.Park, H.Kim, H.Jeong, G.Kim, M.J.Cho, J.Chung, M.Yoon, K.R.Kim and J.Choi: *ISIJ Int.*, **43** (2003), 813.
- 38) Li T.J, K.Sassa and S.Asai: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 21.
- 39) M.Tani, E.Takeuchi, T.Kajiya, K.Shio and K.Miyazawa: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 51.
- 40) T.Suzuki and K.Mori: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 62.
- 41) N.Yoshida, S.Furuhashi and T.Tanaka: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 63.