

スラブ電磁鋳造(EMC)技術の開発

Electromagnetic Casting Technique for Slab Casting

谷 雅 弘*
Masahiro TANI
梅 津 健 司
Kenji UMETSU

瀬 々 昌 文
Masafumi ZEZE
林 和 範
Kazunori HAYASHI

藤 健 彦
Takehiko TOH
田 中 和 久
Kazuhisa TANAKA

恒 成 敬 二
Keiji TSUNENARI
福 永 新 一
Shinichi FUKUNAGA

抄 録

電磁鋳造技術(Electromagnetic Casting: EMC)は、電磁ピンチ力を連続鋳造機の溶鋼湯面近傍(初期凝固部)に印加することにより、鋳片品質を抜本的に改善できる技術である。これまで、ビレット実機連続鋳造機、スラブ試験連続鋳造機、電磁流体シミュレーションによる検討を行い、スラブ実機連続鋳造機において電磁鋳造技術を用いた大断面スラブの連続鋳造に成功し、操業性に問題の無いこと、及び鋳片表面品質の改善効果を確認した。

Abstract

In the electromagnetic casting (EMC) technique, an electromagnetic field is imposed by a solenoidal coil and a Lorentz force is generated at a meniscus. Consequently, a smooth cast surface without defects can be expected. So far concerning with EMC, the billet casting plant test, the slab casting bench scale test on pilot caster and the numerical simulation have been conducted. Finally the slab casting plant tests with the EMC technique were conducted. The castings were very stable and produced without any major difficulties. The qualities of slab cast were greatly improved by the EMC technique.

1. 緒 言

連続鋳造(以後連鋳と略す)プロセスの初期凝固部、つまり鋳型の溶鋼湯面直下に電磁ピンチ力を印加する電磁鋳造(Electromagnetic Casting: EMC)技術を用いると、鋼の初期凝固現象を制御することができて、鋳片の表面品質の改善が期待できる¹⁾。

新日本製鐵(株)はこれまで、電磁ピンチ力を間欠的に印加し、鋳片品質改善効果をさらに高めるパルス電磁鋳造(パルスEMC)技術を提案し^{2,3)}、ビレット試験連鋳機、及びビレット実機連鋳機を用いた鋳造試験を行い、鋳片の表面品質が大幅に改善され、製品圧延前の鋳片表面手入れを省略できる可能性を示した^{4,7)}。また、スラブ試験連鋳機を用いて、小断面スラブ鋳造においても鋳片の表面品質が大幅に改善されることを示した⁷⁻¹⁰⁾。これらの結果を受けて、スラブ実機連鋳機による大断面スラブの鋳造試験を行い¹¹⁻¹³⁾、大断面スラブを対象とした電磁鋳造技術の開発を行った。

本報では、パルス電磁鋳造技術の原理、これまでの開発

経緯、さらには、スラブ実機連鋳機による大断面スラブの鋳造試験結果を報告する。

なお、本報告内容の一部は、財団法人金属系材料研究開発センター(JRCM)が旧通商産業省の補助金を受けて実施した“エネルギー使用合理化金属製造プロセス開発”の成果⁵⁻¹⁰⁾と、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)と新日本製鐵(株)との共同研究“省エネルギーと高品質のための高効率スラブ鋳片電磁鋳造技術の開発”の成果である¹¹⁻¹³⁾。

2. パルス電磁鋳造技術の原理と基礎検討

図1に電磁鋳造技術の原理を示す。連続鋳造法においては、熔融フラックスによる鋳型と凝固シェル、鋳片との間の潤滑のために、鋳型の振動(周期:数Hz, 振幅:数mm)が必要である。その結果、通常の連続鋳造法(図1-左図)においては、熔融フラックスの圧力が周期的に変動して、鋳片表面に鋳造方向にオシレーションマークと呼ばれる、周期的なくぼみ(鋳造方向の間隔:数mm, 深さ:数百 μ m)

* 八幡技術研究部 主任研究員 福岡県北九州市戸畑区飛幡1-1 〒804-8501

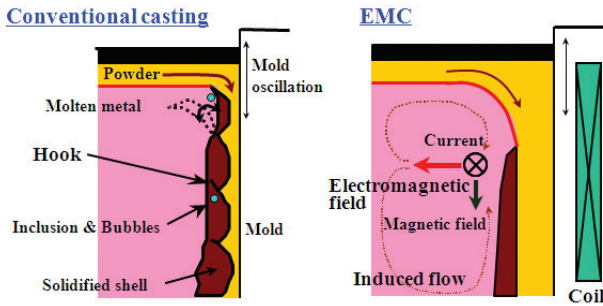


図1 電磁鑄造(EMC)技術の原理
Principle of EMC

が形成される。さらには、低炭素鋼の場合、オシレーションマークの底部にフック(爪状組織)と呼ばれる凝固シェル先端が観察される場合があるが、そのフックに非金属介在物(以後介在物と略す)や気泡がトラップされて、鑄片や製品の欠陥の起点となる可能性がある。

一方、電磁鑄造技術(図1-右図)においては、溶鋼湯面直下近傍にソレノイドコイル(導線を螺旋状に巻いた円筒、又は矩形形状のコイル)を設置して、ソレノイドコイルに交流電流を通電することにより、溶鋼と凝固シェルに誘導磁場と誘導電流を発生させ、その相互作用(フレミングの左手の法則)により、常に鑄型から溶鋼に向かう方向の電磁ピンチ力(ローレンツ力)を作用させる。すると、初期凝固部における溶鋼と凝固シェルに作用する溶鋼静圧が緩和され、溶鋼と鑄型間の溶融フラックス層の厚みが拡大した“軟接触状態”になる。

“軟接触状態”においては、溶融フラックスの圧力の周期的変動が抑制され、また、初期凝固部が緩冷却状態になり、さらには、図1-右図中に示す電磁ピンチ力に誘起された溶鋼流動による凝固シェルの洗浄効果と相まって、オシレーションマークやフックが消失、又は深さが大幅に低減して、かつ欠陥が抑制され、鑄片表面品質の大幅な改善が期待できる。

しかし、従来の電磁鑄造技術には課題があった。その一つは、電磁ピンチ力に誘起された溶鋼流動の流速が過大になり、溶鋼湯面の形状が時間的、空間的に不安定、不均一になり、鑄造方向、又は鑄型の周方向に“軟接触状態”が安定して保持できないことであった。その結果、電磁鑄造による鑄片表面品質の改善効果が安定して得られなかった。

そこで、新日本製鐵(株)は、パルス電磁鑄造(パルスEMC)技術を提案した^{2,3)}。パルス電磁鑄造技術においては、ソレノイドコイルに交流電流を数~数十Hzといった周期で間欠的に通電することにより、初期凝固部における溶鋼と凝固シェルに電磁ピンチ力を間欠的に印加する。そうすることにより、溶鋼に投入される運動エネルギーを抑制することができ、電磁ピンチ力に誘起された溶鋼流動の流速を制御することができる。

図2に水銀を用いた基礎実験結果の一例を示す。水銀を

入れたガラスビーカーの周囲にソレノイドコイルを設置し、交流電流(周波数:200Hz)を間欠的に通電した。その際、次式で定義される間欠印加のパラメータDutyを変化させた。

$$Duty = t_{on} / T \times 100 (\%) \quad (1)$$

T: 間欠印加周期(通電+非通電時間), t_{on} : 通電時間
そして、“軟接触状態”の指標である電磁ピンチ力による水銀表面の盛りりの高さ(Convex Height)と、電磁ピンチ力に誘起された水銀流動の流速(Induced Velocity)を測定した。図2より、誘起流動の流速はDutyと線形関係にあるが、盛りり高さはDutyと非線形関係にあることが分かる。つまり、電磁ピンチ力のDuty=50%の間欠印加を行えば、誘起流動の流速は50%に抑制しつつ、盛りりは約90%程度確保できる。つまり、表面(溶鋼湯面)形状を安定的に保ちつつ、“軟接触状態”を安定的に保持することが期待できる^{2,3)}。

さらに、ソレノイドコイル、溶鋼、鑄型を考慮した電磁場解析と自由表面を考慮した溶鋼流動解析を連成させて¹⁴⁾、パルス電磁鑄造時溶鋼流動、溶鋼湯面挙動の数値シミュレーションを行った。図3にビレットの電磁鑄造を対象と

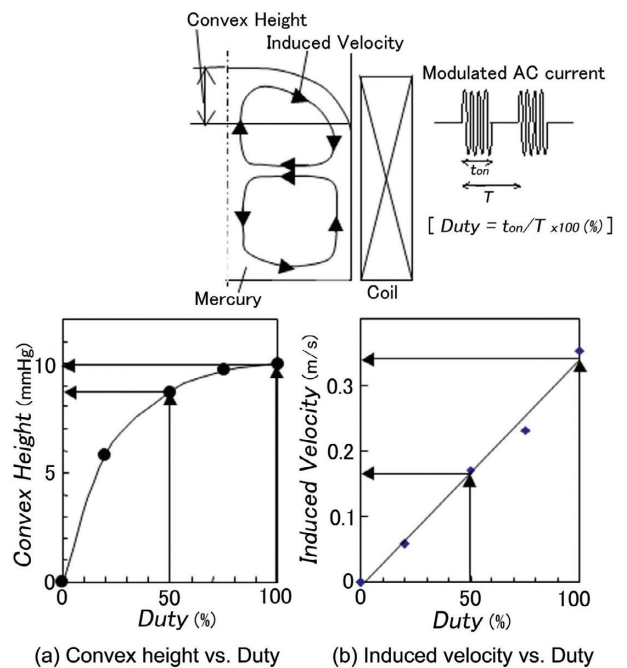
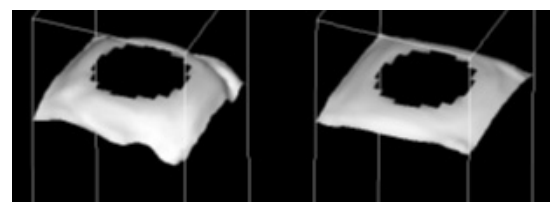


図2 電磁ピンチ力の間欠印加
Pulsative imposition of electromagnetic field



(a) Continuous imposition (b) Pulsative imposition
図3 溶鋼湯面形状のシミュレーション結果
Free surface shape of molten steel

した解析結果の一例を示す。電磁ピンチ力を連続的に印加した場合は、溶鋼湯面形状が鋳型の周方向に不均一であるのに対して、電磁ピンチ力を間欠印加 (Duty = 50%) にした場合は、溶鋼湯面形状が鋳型の周長方向に均一であることが分かる。

3. ビレットの実機連続鋳機による鋳造試験

前章で示した基礎実験及びに数値解析による事前検討、ビレットの試験連続鋳機を用いた低融点合金、及び鋼の鋳造試験^{4,5)}を経て、新日本製鐵(株)室蘭製鐵所においてビレットの実機連続鋳機を用いたパルス電磁鋳造試験を行った^{6,7)}。

具体的には、室蘭製鐵所におけるビレット連続鋳造機、6ストリーム連続鋳機の1つのストリームに、パルス電磁鋳造用のソレノイドコイルと160mm角の鋳型を設置した。ここで、鋳型に関しては、四対の銅板とステンレス鋼製バックプレートからなる組み立て構造を採用して、溶鋼への磁場の浸透性確保と機械剛性確保が両立できる鋳型を開発した。

また、パルス電磁鋳造においては、溶鋼湯面近傍に大きな誘導磁場が発生するため、その誘導磁場がノイズとなり溶鋼湯面レベル制御(注湯量制御)に通常用いる渦流式センサーを使用することが困難である。そこで、図4に作動原理を示すパルス同期型渦流式湯面センサーを開発した。本方式では、ソレノイドコイルへ交流電流を通电しない間、つまり電磁ピンチ力の非印加期に渦流式センサーからの信号を用いて溶鋼湯面レベルのサンプリングを行い、溶鋼湯面レベル制御を行う。

開発したパルス電磁鋳造用のソレノイドコイル、鋳型、パルス同期型渦流式センサーを用いて、パルス電磁鋳造のビレット実機試験を行った。電磁ピンチ力の間欠印加以外の鋳造条件は他のストリームと共通にした。

まず、電磁ピンチ力を間欠印加しても、溶鋼湯面レベル制御等の操作性には何ら影響はなく、安定して長時間鋳造が行えた。図5に電磁ピンチ力の間欠印加の有無によるモールドフラックスの消費量を規格化して示す。電磁ピンチ力

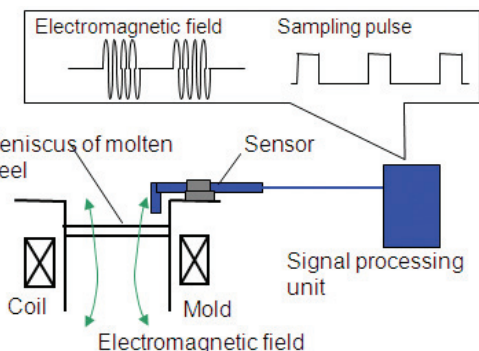


図4 パルス同期型渦流式湯面センサーの作動原理
Meniscus level sensing synchronized to pulsative electromagnetic field

の間欠印加によりフラックス消費量が增大していることが分かる。これは、電磁ピンチ力の間欠印加により、初期凝固部において鋳型と凝固シェルの間隔が拡大したためと考えられ、パルス電磁鋳造により潤滑性が改善されたことを示す。

0.08%C鋼のビレット実機試験において得られた鋳片の表面写真を図6に示す。パルス電磁鋳造においてオシレーションマークは鋳造方向に安定して消失することが確認できた。図7にレーザー変位計を用いて鋳片表面の微小凹凸の表面粗度を測定した結果を示す。パルス電磁鋳造において表面性状が改善されることが分かる。

図8にパルス電磁鋳造により得られた鋳片、及びに電磁ピンチ力を印加しない鋳造で得られた鋳片を圧延して得られた製品における欠陥発生率を示す。ここで、図8の縦軸は、電磁ピンチ力を印加しないで得られた鋳片に表面手入れ(ホットスカーフ)を行わないで圧延して得られた製品における欠陥発生率で規格化している。パルス電磁鋳造により得られた鋳片は鋳片表面手入れを行わなくても、電磁

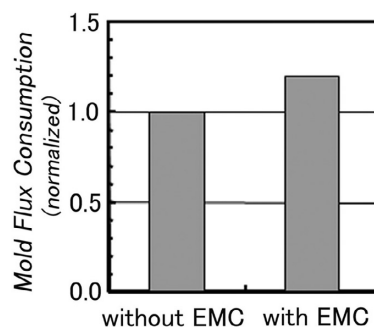


図5 モールドフラックスの消費量
Mold flux consumption

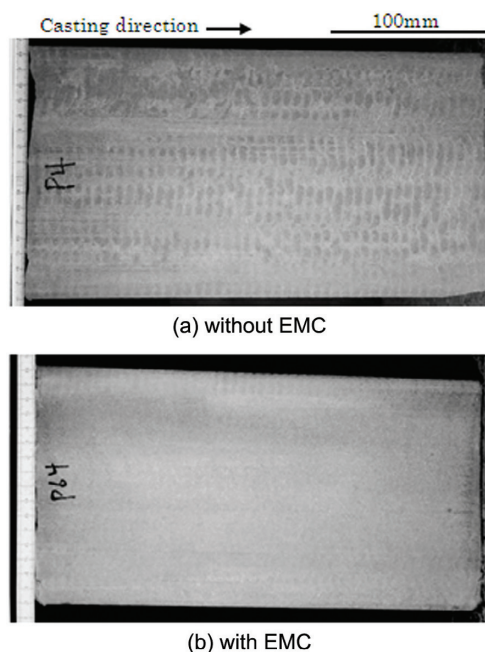


図6 ビレット実機鋳造鋳片の表面性状(0.08%C鋼)
Surface appearance of cast billet (0.08%C steel)

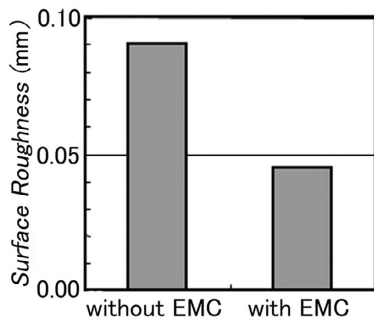


図7 ビレット実機鑄造鑄片の表面粗度(0.08%C鋼)
Surface roughness of cast billet (0.08%C steel)

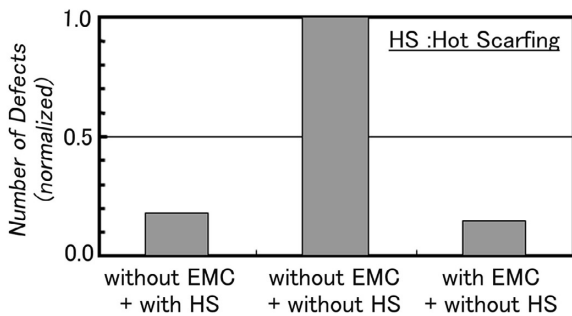


図8 製品欠陥個数(0.1%C鋼)
Number of defects (0.1%C steel)

ピンチ力を印加しなくて鑄片表面手入れを行った鑄片と同等以上の製品品質が得られることが分かる。つまり、パルス電磁鑄造により鑄片表面手入れを省略できる可能性が明らかになった。

4. 小断面スラブの試験連鑄機による鑄造試験

ビレットを対象とした電磁鑄造技術の基盤技術が確立したので、次に、スラブを対象とした電磁鑄造技術の開発に移行した。ここではまず、新日本製鐵(株)君津製鐵所内の試験連鑄機を用いた小断面スラブの鑄造試験を行った⁷⁻¹⁰⁾。具体的には、機長8mの垂直型試験連鑄機に、図9に示すパルス電磁鑄造用のソレノイドコイルとスラブ鑄型を設置した。鑄型サイズは内寸400mm×100mm及び800mm×

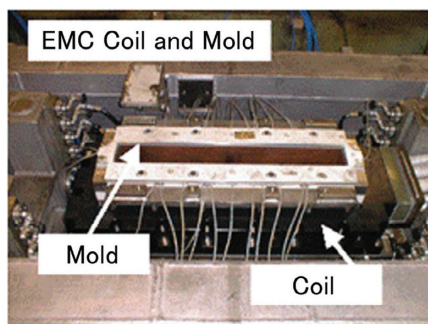


図9 パルス電磁鑄造用鑄型とコイル
Mold and coil for pulsative EMC

100mmであり、四対の銅板とステンレス鋼製バックプレートからなる組み立て構造を採用して、溶鋼への磁場の浸透性確保と機械剛性確保が両立できる鑄型を開発した。また、溶鋼湯面レベル制御は、パルス同期型渦流式湯面センサーを用いて行った。

スラブ鑄型を用いたパルス電磁鑄造試験において得られた低炭素アルミキルド鋼の鑄片の表面写真を図10に示す。パルス電磁鑄造においてオシレーションマークは鑄造方向に安定して消失することが確認できた。図11にはスラブ鑄片の表皮下凝固組織を示す。パルス電磁鑄造において鑄片表面のオシレーションマークの深さ、及び表皮下のフック(爪状組織)の深さが大幅に低減していることが分かる。図12にレーザー変位計を用いてスラブ鑄片表面の微小凹凸の表面粗度を測定した結果を示す。鑄型断面積がビ

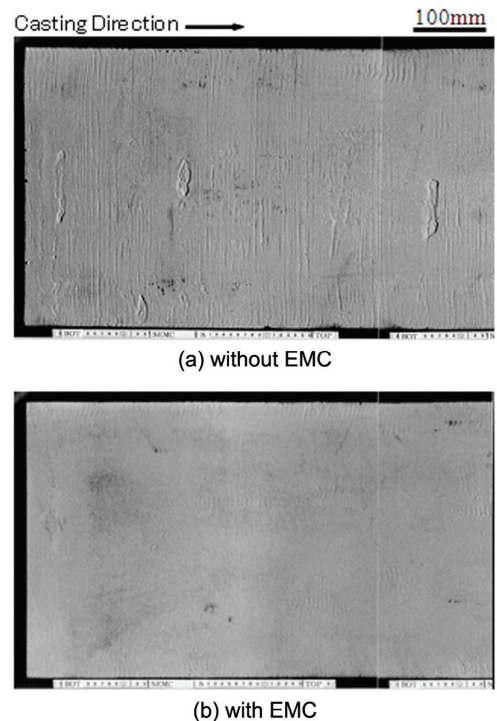


図10 小断面スラブ鑄片の表面性状(0.2%C鋼)
Surface appearance of cast slab (0.2%C steel)

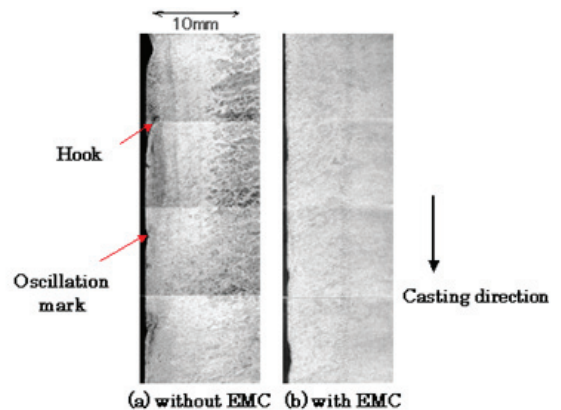


図11 小断面スラブ鑄片の表皮下凝固組織
Solidified structure of cast slab (0.2%C steel)

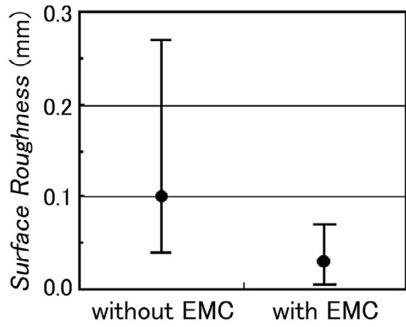


図12 小断面スラブ鑄片の表面粗度(0.2%C鋼)
Surface roughness of cast slab (0.2%C steel)

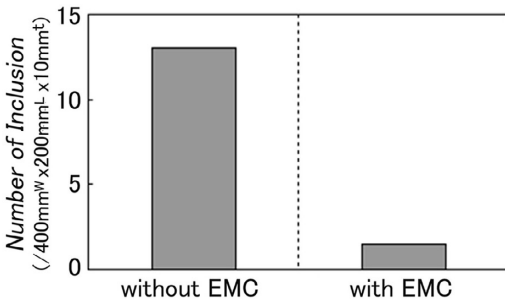


図13 小断面スラブ鑄片表面の介在物個数
Number of Inclusion at cast slab surface

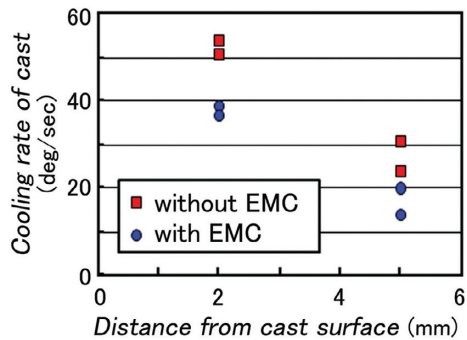


図14 小断面スラブ鑄片の冷却速度
Cooling rate at cast slab surface

レットより大きい小断面スラブ鑄造の場合においても、電磁ピンチ力の間欠印加によりビレット鑄造の場合とほぼ同様に鑄片表面性状が改善されることが分かった。

図13に、段削りにより求めた鑄片表面から10mm深さ迄の100 μ m以上の介在物個数を示す。パルス電磁鑄造において鑄片表層の介在物が大幅に減少していることが分かる。これは、鑄片表皮下のフックの深さが低減し、介在物が捕捉されにくくなったことと、電磁ピンチ力に誘起された溶鋼流動による凝固シェル洗浄効果によると考えられる。

図14に鑄片表皮下の dendrite アーム間隔から求めた初期凝固部の冷却速度を示す。パルス電磁鑄造において70~80%冷却速度が低減していることが分かる。電磁ピ

ンチ力により凝固シェルと鑄型間の距離が拡大し、初期凝固部の熱抵抗が増大して、緩冷却状態になったと考えられる。

5. スラブの実機連鑄機による鑄造試験

試験連鑄機を用いた小断面スラブの鑄造試験において鑄片の表面品質の改善効果が確認できたので、新日本製鐵(株)八幡製鐵所においてスラブの実機連鑄機を用いたパルス電磁鑄造試験を実施した¹¹⁻¹³⁾。

初めに、ソレノイドコイル、溶鋼、鑄型、周辺構造物を考慮した電磁場解析、溶融フラックスと自由表面を考慮した鑄型内の溶鋼流動と溶鋼湯面の数値シミュレーション、鑄造中における鑄型の構造解析を行った。そして、実機サイズの大断面スラブ鑄造においても、“軟接触状態”が得られる電磁ピンチ力の溶鋼への間欠印加が可能で、溶鋼湯面挙動と溶鋼流動状態が安定に保たれ、鑄型の剛性が確保できるパルス電磁鑄造用の電源、ソレノイドコイル、内寸1200~1600mm×250mmの鑄型を開発した。

図15に、溶融フラックスと自由表面を考慮した鑄型内の溶鋼流動と溶鋼湯面の数値シミュレーション結果の一例を示す。1280mm×250mmという大断面スラブを対象としたパルス電磁鑄造時においても、鑄型幅方向に均一な溶鋼湯面形状、及び鑄型幅方向に均一な鑄型近傍の溶鋼流動が期待できることが確認できた。図16に、鑄造中における鑄型の構造解析結果の一例を示す。鑄造中におけるパルス電磁鑄造用鑄型の変形量は、通常の鑄型の変形量と同等

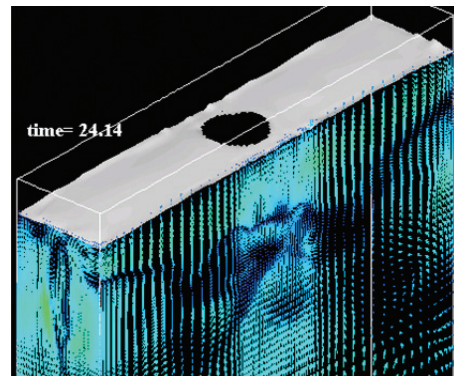


図15 電磁鑄造時の鑄型内溶鋼挙動のシミュレーション結果
Flow pattern of pulsative EMC

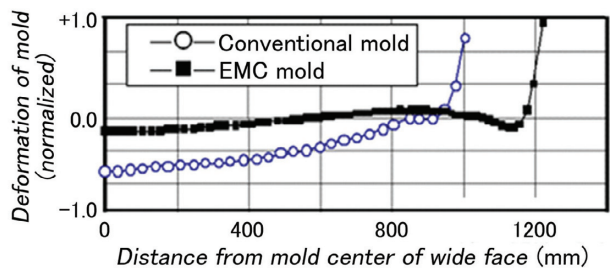


図16 鑄造中の鑄型変形量の解析結果
Deformation of mold for pulsative EMC

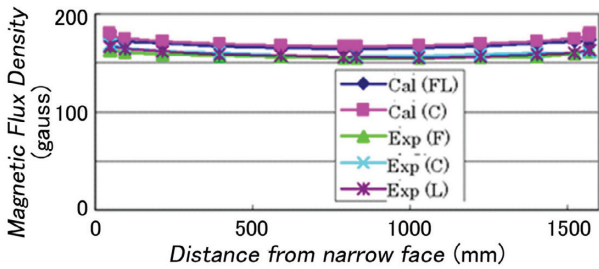


図17 電磁ピンチ力印加時の鑄型内の磁束密度分布
Electromagnetic flux density in the mold for pulsative EMC

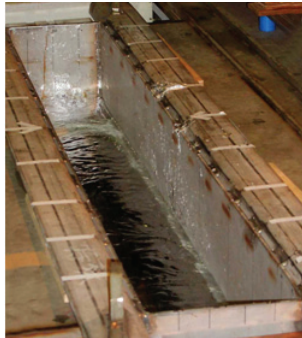


図18 電磁ピンチ力の間欠印加時の低融点合金湯面挙動
Experiment with low-melting-point alloy

以下であることが分かる。また、図17には、電磁ピンチ力の印加時の鑄型内における、垂直方向の磁束密度の電磁場解析結果と実測結果の一例を示す (Cal: 解析値, Exp: 実測値, F, L: 鑄型長辺近傍, C: 鑄型厚み中心)。1 600 mm × 250 mm という大断面スラブ鑄型において、鑄型の長辺方向に均一な磁場分布が得られていることが分かる。

次に、実機スラブ連鑄機に開発したパルス電磁鑄造用の電源、ソレノイドコイル、鑄型を設置し、鑄型内にステンレス製鋼容器を挿入し、さらにSnPb系の低融点合金を溶融状態で注ぎ、電磁ピンチ力を間欠印加して湯面の安定性を評価した。図18に、電磁ピンチ力を間欠印加中の低融点合金の湯面写真を示すが、鑄型幅方向に均一で安定な湯面挙動が確認できた。また、電磁ピンチ力を間欠印加中の誘導磁場による鑄型、及び周辺構造物の誘導発熱、温度上昇も当初懸念されたが、実測の結果、問題はなかった。

そして、上記のパルス電磁鑄造用の電源、ソレノイドコイル、鑄型を用いて、鑄片断面サイズ1 200 mm × 250 mm, 1 600 mm × 250 mm の低炭素アルミキルド鋼を鑄造した。ここで、溶鋼の湯面レベルはパルス同期型渦流式湯面センサーを用いて測定し、溶鋼注入量の自動制御を行った。まず、電磁ピンチ力の間欠印加時においても、溶鋼湯面レベルや注湯量は安定して制御でき、その他の操作性に関しても通常の鑄造と同様であり、安定して長時間鑄造ができた。

得られたスラブ鑄片の品質に関しては、鑄片表面のオシ

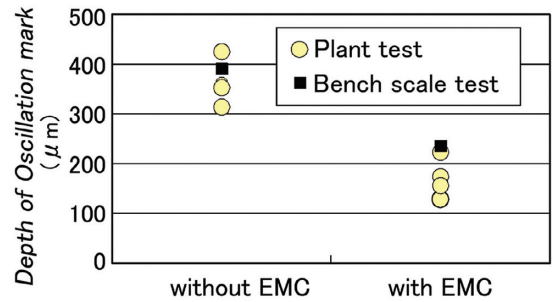


図19 スラブ実機鑄造鑄片におけるオシレーションマーク深さ
Depth of oscillation mark

レーションマークの深さを、鑄片全幅にわたり評価した。図19に小断面スラブの試験鑄造鑄片の結果と共に示すが (Plant test: 実機連鑄機条件, Bench scale test: 試験連鑄機条件), パルス電磁鑄造により、大断面スラブの実機鑄造においても、ビレットや小断面スラブの鑄造と同様に、鑄片表面性状が安定して大幅に改善されることが確認できた。

6. 結 言

ビレットの実機連鑄機を用いた鑄造試験、小断面スラブの試験連鑄機を用いた鑄造試験を行い、鑄片の表面品質の改善を確認し、パルス電磁鑄造に関する基盤技術を確立した。

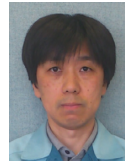
そして、パルス電磁鑄造技術を用いた大断面スラブ鑄造用の電源、ソレノイドコイル、鑄型を開発し、実機鑄造試験を実施した。その結果、操作性になら問題の無いこと、及び大断面スラブ鑄片の表面品質の改善効果を確認した。

参考文献

- 1) 竹内栄一 ほか:材料とプロセス.6 (4), 1125 (1993)
- 2) 藤 健彦 ほか:材料とプロセス.8 (1), 215 (1995)
- 3) Toh, T. et al.: ISIJ-Int. 37 (11), 1112 (1997)
- 4) 谷 雅弘 ほか:電磁力を利用した材料プロセッシングの新展開. 日本鉄鋼協会, 1999, p. 113
- 5) 谷 雅弘 ほか:材料とプロセス.12 (1), 51 (1999)
- 6) 谷 雅弘 ほか:材料とプロセス.13 (4), 815 (2000)
- 7) Tani, M. et al.: 材料とプロセス.15 (4), 831 (2002)
- 8) 谷 雅弘 ほか:材料とプロセス.14 (12), 163 (2001)
- 9) 谷 雅弘 ほか:材料とプロセス.14 (4), 890 (2001)
- 10) Tani, M. et al.: Proc. 4th European Conf. on Continuous Casting. Birmingham, 2002, p. 39
- 11) Tani, M. et al.: Proc. 5th Int. Symposium on Electromagnetic Process of Materials. Sendai, 2006, p. 63
- 12) 谷 雅弘 ほか:材料とプロセス.20 (4), 820 (2007)
- 13) Tani, M. et al.: Int. J. Cast Metals Research. 22 (2009)
- 14) Fujisaki, K. et al.: J. Appl. Phys. 83 (11), 6356 (1998)



谷 雅弘 Masahiro TANI
八幡技術研究部 主任研究員
福岡県北九州市戸畑区飛幡 1-1 〒 804-8501



梅津健司 Kenji UMETSU
設備・保全技術センター システム制御技術部
マネジャー



瀬々昌文 Masafumi ZEZE
八幡技術研究部 主幹研究員
工博



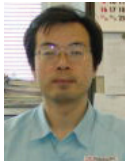
林 和範 Kazunori HAYASHI
設備・保全技術センター 機械技術部
主任研究員 工博



藤 健彦 Takehiko TOH
先端技術研究所 数理科学研究部
主幹研究員 博士(環境科学)



田中和久 Kazuhisa TANAKA
八幡製鐵所 製鋼部 鋼片精整課長



恒成敬二 Keiji TSUNENARI
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 マネジャー



福永新一 Shinichi FUKUNAGA
八幡製鐵所 製鋼部 マネジャー