

高周波電磁場を利用した鋼の連続鋳造における 初期凝固制御

古橋 誠治*・吉田 勝*・田中 努*

Control of Early Solidification by the Use of High Frequency Electromagnetic
Field in the Continuous Casting of Steel

Seiji FURUHASHI, Masaru YOSHIDA and Tsutomu TANAKA

Synopsis : In order to improve surface quality of continuously cast steel, alternating magnetic field was applied through the copper mold to the early solidification zone of round billet. The mold has a number of slits and was specifically designed to achieve the efficient penetration of the field as well as high stiffness. A mold size is 0.18 m in internal diameter and is surrounded with a multi-turn induction coil. Casting velocity is 1.2 m/min. The capacity of high frequency generator is 300 kW and the frequency is 25 kHz.

0.11% carbon steel was cast to investigate the effects of the intensity of magnetic field and the imposing area on the surface quality of billets. Even under the strong magnetic field, the meniscus level was controlled precisely by RFLC method (Resonant Frequency Level Control Method) detecting the small shift of resonant frequency of high frequency generator.

Surface marks on the cast billets had three types by the imposition of electromagnetic field. Regular surface marks caused by the mold oscillation have disappeared by selecting the optimum meniscus level under suitable electric power. By the use of developed two fluids model based on VOF code, dynamics of meniscus shape at the early solidification zone during oscillation were studied theoretically. The model shows that the disappearance of oscillation marks is responsible for the stability of interfacial shape between flux and molten steel by the imposition of electromagnetic field.

Key words: high frequency electromagnetic field; continuous casting; oscillation mark; surface quality; hypo-peritectic steel; electromagnetic processing of materials.

1. 緒言

近年、鋼の連続鋳造における鋳型内の初期凝固制御に関し、従来の鋳型振動、潤滑剤の使用に加えて新たな手段として鋳型内の湯面レベル近傍に交流電磁場を印加する電磁鋳造法(EMC: Electromagnetic Casting)が検討されている。そこでは、電磁場の印加により鋳片表面性状が改善されるなどの初期凝固制御の可能性が報告されている¹⁻⁵⁾。

初期凝固制御を確実な技術とするためには、鋳造時の湯面位置を最適な位置に保持し、かつその変動量を最小にすることが必要である。しかし、外部から湯面近傍に電磁場を印加する EMC に、従来から湯面レベル制御に使用されている渦流センサーを用いると、電磁気的な相互干渉により渦流センサーは機能しなくなる。そこで、交流電磁場、特に高周波電磁場の存在下で有効な新しい湯面レベルセンサーの開発が必要である。

本報では湯面近傍に鋳造方向に沿ってスリットを有する丸ビレット対象の鋳型を用い、高周波電源の発振周波数の微小変化を検知する新しい湯面レベル制御法を提案し、制御の可能性を基礎実験により調査した。続いて、この方法

を鋼の連続鋳造で確認した。さらに、湯面レベル条件を変更して鋳造を行い、高周波電磁場が鋳片の表面性状に与える影響について検討した。

2. 鋳型構造

鋳造実験で使用した内径が $\phi 180$ mm の丸ビレット鋳型構造の概要を Fig. 1 に示す。鋳型の上部の湯面近傍には鋳造方向に平行に、幅が約 0.2 mm のスリットを 28 本設けている。スリットにより仕切られた各セグメント内には冷却水流路が設けられている。このスリットにより電磁場の鋳型内への浸透が可能となる。従来のスリット付き鋳型³⁾は鋳型上端までスリットを設けた構造であるが、鋳造実験で使用した鋳型は上端が 5 mm の長さで連結されており鋳型剛性を高める⁵⁾工夫をした。鋳型上端の連結による短絡電流のため、鋳型上部での磁束密度は若干低下する⁵⁾。しかし、溶鋼または凝固シェルが存在する領域では磁束密度に顕著な差は見られないため、上端が接続された構造の鋳型を用いた。鋳型の外周に巻いた多重らせん構造の通電コイルに高周波電流 J_0 を流すと、誘導磁場 B と誘導電流 J_m が発

平成 10 年 4 月 8 日受付 平成 10 年 6 月 4 日受理 (Received on Apr. 8, 1998; Accepted on June 4, 1998)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research and Development Laboratories., Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasaki-machi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-0255)

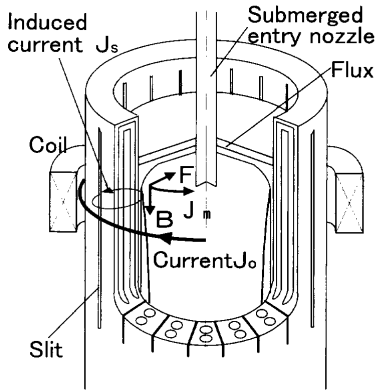


Fig. 1. Schematic view of the electromagnetic mold.

生ずる。これらの相互作用によりローレンツ力 F （ラプラス力）が溶鋼に働き湯面形状を凸状に隆起させ、また誘導電流により鋼の加熱作用が生じる。湯面の形状制御と加熱作用さらに電磁攪拌の結果、鋳型内初期凝固制御の可能性が期待できる。印加する電磁場の周波数は25 kHz近傍の条件を用いた。その理由は、25 kHzでは電磁浸透深さ（鋼中で約4 mm）が装置代表長さ（この場合鋳型径 $\phi 180$ mm）より十分浅く、誘起される電磁気力は湯面に対して圧力的な非回転力として作用する¹⁾結果、湯面形状の安定化が十分期待されると判断したためである。

3. 湯面レベル検知技術

3.1 検知原理

使用した高周波発振器はコイルや鋳型も含むインダクタンス L とキャパシタンス C の並列共振回路で近似的に表され、(1)式の共振周波数 f_0 で発振する。

$$f_0 = 1 / (2\pi \sqrt{LC}) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、コイル内の電氣的負荷、ここでは鋳型内の溶鋼の湯面位置が変化すると共振回路のインダクタンス L が変化し、(1)式に従って発振周波数 f_0 が変化する。すなわち湯面が上昇するとインダクタンスが低下して、周波数は上昇する。湯面が下降すれば周波数も低下する。この新しい湯面検知法を共振周波数を検知する原理から、RFLC法 (Resonant Frequency Level Control Method)と呼ぶ。

3.2 基礎実験による原理確認

基礎検討として、内径 $\phi 45$ mmのスリット付き鋳型を用い、模擬溶鋼として低融点金属の錫（融点232°C）を用いた。実験装置の概要をFig. 2に示す。電源出力は最大50 kWで周波数は19 kHz近傍である。通電コイルは周回された3ターンとした。なお、ここでは後述する鋳造実験とは別の高周波電源装置を使用した。そのため、周波数域が若干異なっているが、本湯面レベル検知の原理からは電源が共振回路で発振し、かつコイル内の負荷の変動を共振周

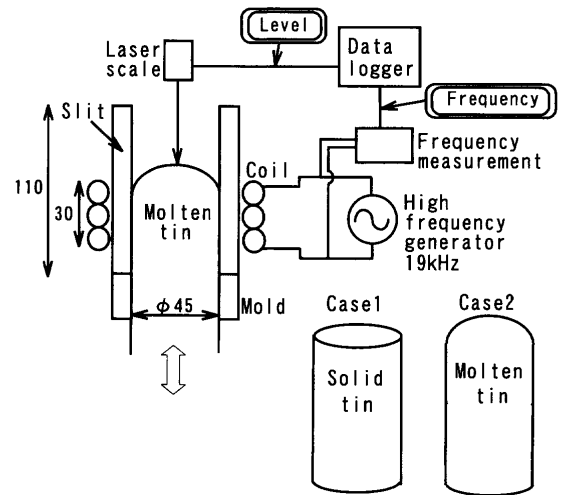


Fig. 2. Experimental apparatus for the principle test of RFLC.

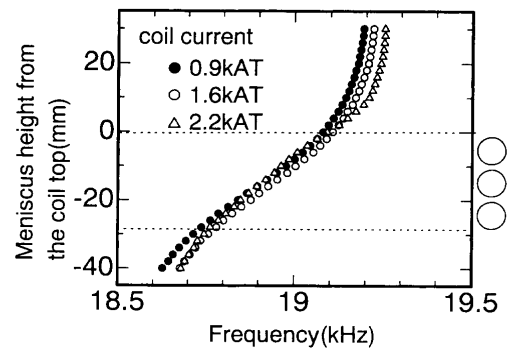


Fig. 3. Relation between top level of solid tin and resonant frequency.

波数の変化で追従するタイプの発振方式の高周波電源であれば同様な結果が得られる。スリット付き鋳型内に模擬溶鋼として円柱状の固体錫を挿入し、高周波発振時の湯面相当位置と共振周波数の相関を調べた。また高周波加熱により錫を溶融し、電磁気力により湯面形状を凸状に隆起させた条件でも実験を行った。この場合、湯面位置はレーザー変位計で測定し、隆起の頂点を湯面位置とした。Fig. 3に固体状態の結果、Fig. 4に溶融状態で連続的に湯面位置を変化させた場合の周波数の経時変化を示す。高周波の出力により若干、相関曲線は変化するが、固体・溶融のどちらにおいても湯面レベルと周波数には明確な相関が認められ、湯面レベルの上昇と共に共振周波数は増大した。高周波出力による相関曲線の変化は負荷の温度変化ならびに共振等の抵抗の変化に起因するものと考えられる。相関関係は湯面レベルがコイル巻き高さ内にある場合には変化率が大きく、湯面検知として応用できることが判明した。ただし、コイル上端より上の範囲では周波数の変化率が小さい、つまり、検知感度が低下するため制御が困難になることが予想された。特に、高周波電磁場による鋳片表面粗度の改善には湯面レベルがコイル上端近傍で効果がある⁶⁾という報告もあり、この位置での検知精度の向上が必要である。

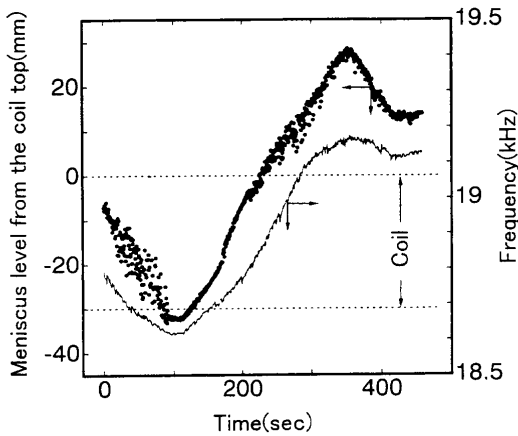


Fig. 4. Relation between meniscus level of molten tin and resonant frequency.

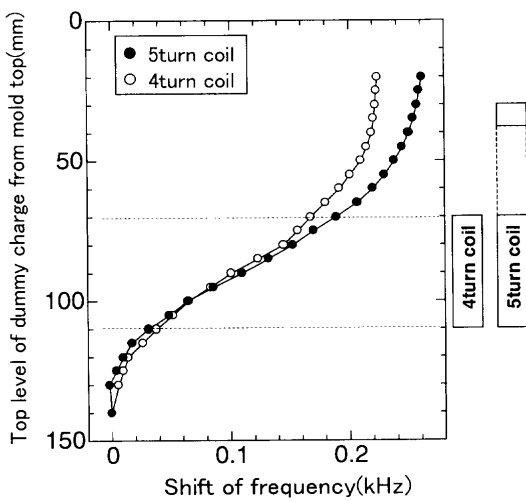


Fig. 5. Relation between top level of dummy SUS charge and the shift of resonant frequency.

そこで、上方での検知感度を高めるため、上方に1ターンを10 mm 離して追加したコイルを製作したところ、コイル上端以上の範囲で検知感度が向上し、周波数変化が約3倍になることが判明した。

そこで、鑄造実験ではφ180 mm 鑄型を対象に4ターンコイルに1ターンを32 mm 離して追加した改良型の5ターンコイルを用いた。鑄型内に水冷のステンレス製模擬溶鋼を挿入し、模擬湯面高さを変えた時の周波数変化を測定した。両者の関係はFig. 5に示すように、目標とする湯面レベル(コイル上端近傍)で周波数の変化率が大きくなり、湯面の変化100 mm に対して、周波数は200 Hz 程度変化することが分かった。

4. 鑄造実験装置および実験条件

湯面レベル制御システム(RFLC)は従来の渦流センサーを用いて湯面制御を行っていたシステムを流用したもので、鑄造中の周波数の変化を電圧変化に変換し従来のシステムと結合した。事前に調査した周波数-湯面レベルの相

Table 1. Casting conditions.

Mold size	φ 180mm
Steel grade	0.11mass%C Steel
Casting velocity	1.2 m/min.
Casting length	2.0 m
Oscillation	stroke: 6 mm cycle: 140c.p.m.
High frequency generator	frequency:25kHz output:max 300kW

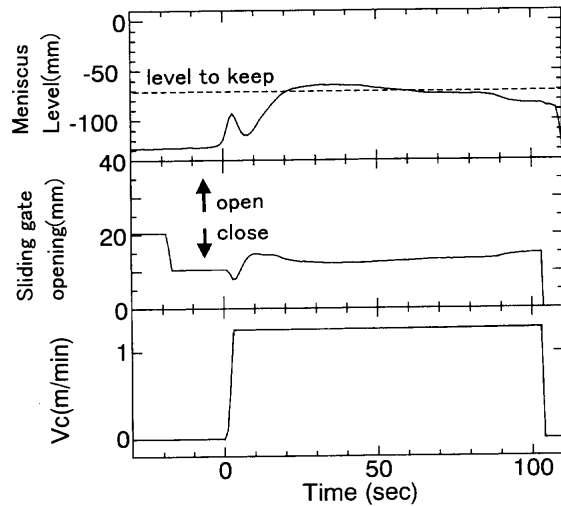


Fig. 6. Meniscus level during continuous casting by the use of RFLC system.

関曲線を制御系に入力しておくことで湯面レベルに応じたスライディングゲートの制御を行う仕組みになっている。また、鑄造は全て自動化され、湯面が所定位置に達すると自動引き抜きを開始する機構となっている。

実験条件を Table 1 に示す。実験に用いた鋼種は亜包晶鋼(C=0.11 mass%)である。1.2 m/min の鑄造速度で2.0 m の引き抜きを行った。高周波電磁場の印加条件は発振周波数は25 kHz 近傍、出力は max 300 kW の電源を使用し、高周波出力と湯面レベルをパラメータに実験を行った。

5. 鑄造実験結果

5.1 湯面レベル検知

鑄造時の湯面レベル制御の一例を Fig. 6 に示す。安定期は±5 mm 以下の湯面変動で自動制御が達成でき、RFLC 法による制御が可能であると確認できた。なお、目標レベルからのシフトは制御パラメータの選定が最適でないため、この点は今後改善される。

5.2 鑄片の表面性状

鑄造の結果得られた代表的な鑄片表面の外観を Fig. 7 に示す。鑄型上端までスリットの存在する鑄型を使用した際には溶鋼がスリットへ差し込む現象が見られた⁷⁾。しかし、上端を連結した鑄型を用いた鑄片には湯差しの痕跡は全く認められなかった。これは Fig. 1 の鑄型の模式図に示すよ

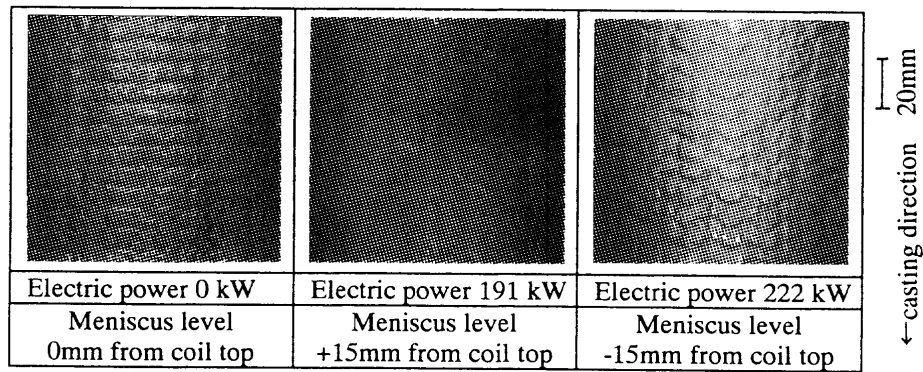


Fig. 7. Typical surface appearance of cast billets.

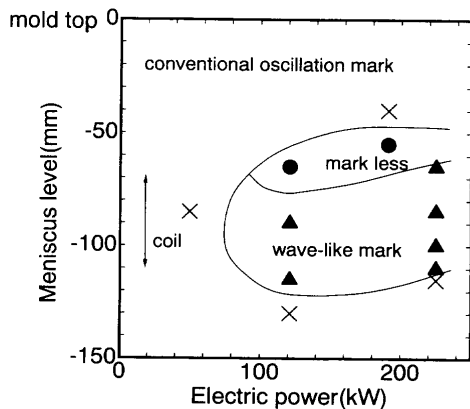


Fig. 8. Effect of electric power and meniscus level on surface mark.

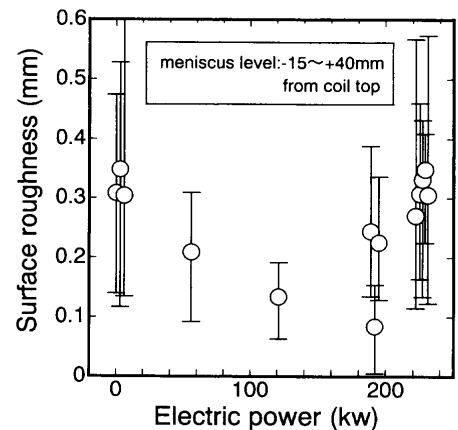


Fig. 9. Relation between surface roughness and electric power.

うに、鋳型最上端が結合された結果、鋳型の剛性が高まり、スリットの開きが抑制されたためであると考えられる。

φ180 mm 鋳型で得られた鋳片表面性状は高周波電源の出力、湯面レベルにより種々変化し、オシレーションマーク（以下 OSM と表記する）の形態は以下の 3 タイプに分類された。第一は電磁場を印加しない場合に認められる Fig. 7 左の規則的な OSM である。第二は比較的湯面が高い場合に電磁場を印加したときに認められる Fig. 7 中央の OSM である。このとき、OSM は消失する、あるいはその深さが軽減された形態である。第三は比較的湯面が低い場合に電磁場を印加したときに認められる Fig. 7 右の OSM である。このとき、OSM は山型の波打った形態となる。

高周波電源の出力と、湯面レベルをパラメータとした 3 タイプに分類した OSM の形態との関係は概ね Fig. 8 に示すようにまとめることができた。これから、表面性状は高周波出力のみならず湯面レベルにも顕著に依存していることが分かる。定性的には、湯面レベルがコイル上端近傍の比較的高い場合に OSM が軽減され、湯面レベルが低下するにつれて、波状 OSM、通常の規則的な OSM へと遷移する。逆に高すぎる場合には、通常の OSM が現れた。また、鋳片の表層の縦断面組織を観察すると、電磁場を印加しない場合には凝固シェル先端での溶鋼のオーバーフローに起因する爪状 OSM がおよそ 80% の確率で確認されたが、表

面粗さが改善された部位の鋳片表面には爪状 OSM の発生は無かった。

湯面レベルがコイル上端から -15 mm ~ +40 mm 高さの条件における鋳片表面の表面粗度と高周波出力の関係を Fig. 9 に示す。表面粗度は OSM 間隔での最大高さと最小高さの差として定義した。高周波電磁場を印加することにより表面粗度が減少することが分かる。しかし、特定の高周波出力の値を超えると、再び表面粗度は通常 OSM の粗度に近づく結果が得られ、最適な高周波出力値の存在が予想される。これは高周波出力を大きくしすぎると、湯面は大きく盛り上げられ鋳型と溶鋼との接触点が低下し、結果的に初期凝固シェルに作用する鋳型との接触圧力が大きくなり軟接触化¹⁾が阻害される⁵⁾。同時に、盛り上げられた溶鋼内での流動が増大し、周方向または軸方向での湯面形状が不安定となり、鋳型との接触状態が時間的に変化する結果、表面性状改善効果が低減するためと考えられる。

6. 二流体モデルによる初期凝固部の考察

鋳型オシレーション期間における鋳型内の溶鋼、モールドフラックスの動的な挙動を把握するため、VOF 法に基づいた改良二流体モデルによる熱流体解析⁶⁾を実施した。

Table 2. Calculation conditions.

Dimensionless number	Value	Dimensionless number	Value
$Re=Vc \cdot A/\nu$	7.95	$Nu=h \cdot A/k$	0.00191
$Fr=Vc^2/g \cdot A$	-0.0157	$S=Vc/A \cdot f$	3.14
$We=\rho \cdot Vc^2 \cdot A/\sigma$	7.95	$Y=\Delta T \cdot Cp/\Delta H$	6.79
$Mo=g \cdot \nu^4 \cdot \rho^3/\sigma^3$	-8.00	$Pr=\nu \cdot \rho \cdot Cp/k$	0.06

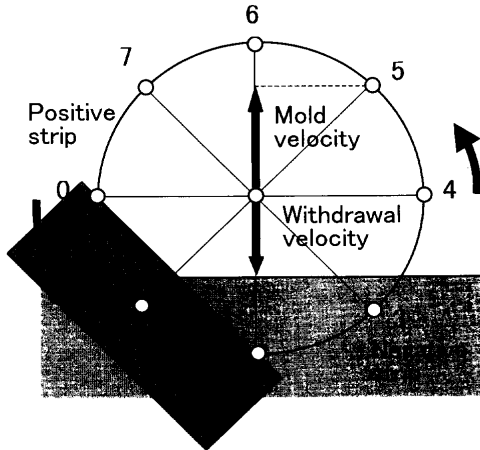


Fig. 10. Velocity circle of oscillation.

表面粗度を議論するためには、二流体モデルでOSMを記述する必要がある。フラックスは熔融状態を仮定し、溶鋼は凝固を考慮した。初期条件は鋳型内に溶鋼が満たされ、モールドフラックスがその上を覆っている状態とし、凝固シェルの引き抜きとともに、やがて、フラックスが鋳型—溶鋼間に侵入する。凝固シェルは、溶鋼がある位置で凝固温度以下に低下すると、完全剛性体で、所定の鋳造速度で鉛直下方へ移動すると仮定した。このモデルではフラックスの流路幅はフラックスと溶鋼の動的ならびに熱的挙動により決定される。一般にフラックスの流路幅は熔融フラックスの層厚に比較して小さいが、溶鋼/フラックスの界面およびフラックスの自由表面の変化を同時に記述するために、両者を同程度の大きさで計算した。したがって、ここで得られる結果は定性的である。計算条件を無次元化してTable 2に示す。計算領域は引き抜き方向に 8.0×10^{-3} m、幅方向に 4.0×10^{-3} mである。また、フラックス流路幅と層厚を同程度に設定したことに起因して、 We 、 Mo 数は、実際の鋼の連続時の値に比較して大きく、 Nu 数は小さい。その他は現実の鋳造系に無次元数をほぼ一致させた。Fig.10は計算したオシレーション期間の鋳型の速度変化を示す。縦軸は鋳型速度を表す。記号1~3は鋳型の下降速度が鋳片の引き抜き速度より大きくなるネガティブストリップ（以下NSと表記する）期である。電磁場を印加しない条件でFig.10の各位相に対応する鋳型近傍の溶鋼湯面および初期凝固シェルの動的挙動を鋳型内壁近傍の幅 2.7×10^{-3} mの領域のみFig.11に示す。鋳型振動速度および鋳型の位置をそれぞれ鋳型面に矢印および黒丸で記し、温度分

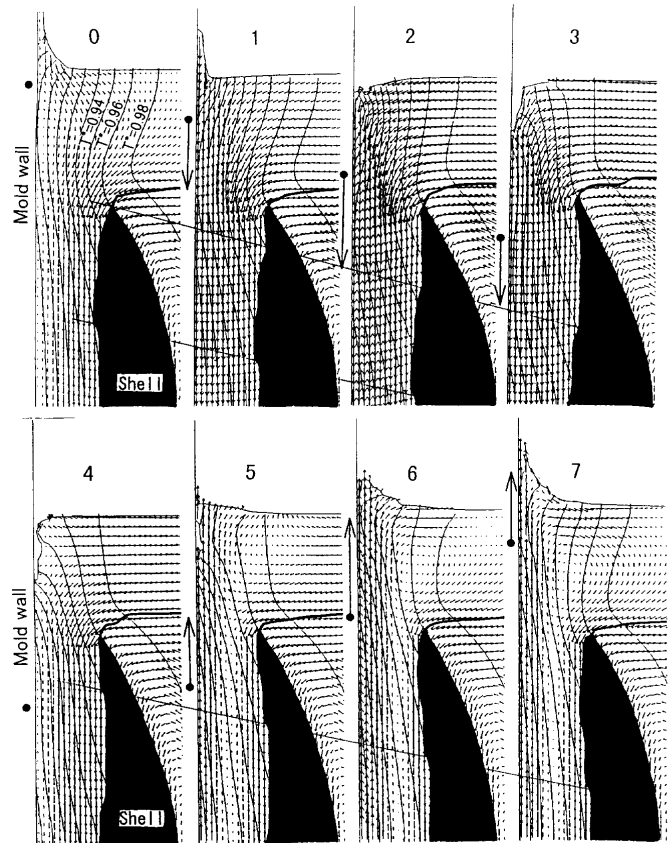


Fig. 11. Calculated dynamic meniscus behavior during oscillation without magnetic field.

布を(2)式で無次元化した温度 T^* の等温線で記した。

$$T^*=(T-T_0)/(T_1-T_0) \dots \dots \dots (2)$$

$T^*=0.98$ から図中左方へ0.02間隔で示す。凝固シェルは $T^*=0.963$ 以下の温度である。図にはシェルの移動推移を実斜線で示した。Fig.10中に示すように、記号0~2の期間、つまりポジティブストリップ（以下PSと表記する）期の終わりからNS期の間までは溶鋼湯面は鋳型から離反し、鋳型と溶鋼湯面または凝固シェルの間隔、いわゆる流路幅が拡大し、記号1で最も大きくなる。一方、NS期の終わり（記号3）から溶鋼湯面は鋳型方向に引き寄せられる。フラックスの流路幅が最も小さくなるのは記号5の時期である。そして再び溶鋼湯面は鋳型から離反する。以上により溶鋼湯面はオシレーションの一周期で変動するため、鋳片表面ではオシレーションマークと呼ばれる周期的な凹凸が形成されることになる。

次に、電磁場を印加した場合を考察する前に、溶鋼湯面の静的な形状について考える。Fig.12には鋳型壁近傍の湯面形状の模式図を示し、その下に模式図内に破線で示した鉛直方向高さでの溶鋼表面に作用する圧力バランスを示す。静的な形状は、溶鋼/フラックスの界面張力とそこに作用する静圧、および磁気圧力の平衡条件から決まる。この時、界面張力は曲率半径に反比例するので、凝固シェルの先端から鋳型に溶鋼湯面が接近するほど鋳型から離反す

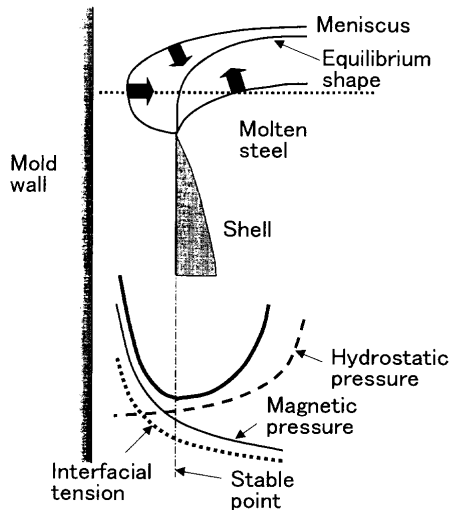


Fig. 12. Force acting on the meniscus.

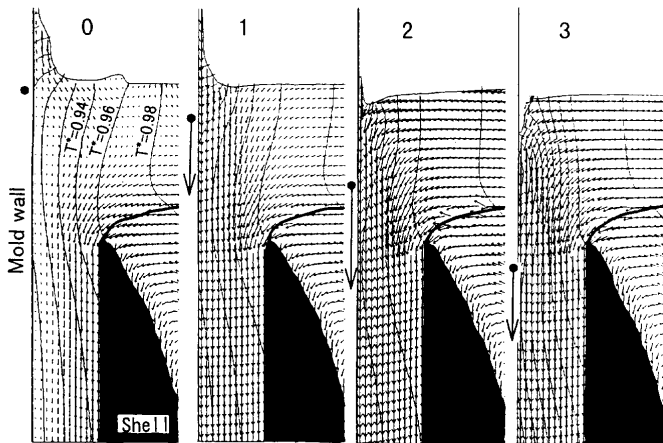


Fig. 13. Calculated dynamic meniscus behavior during oscillation with magnetic field.

る方向に大きな力が作用する。つまり、界面張力は近似的に鑄型から押し戻されるバネ力で表される。一方、磁場分布は鑄型中心軸に対して軸対称で、鑄型壁から離れるに従って減衰する。したがって、磁気圧力は定性的に表面張力と同等の作用をすると考えられる。

鑄型振動が存在する動的挙動の場合には溶鋼湯面はその平衡形状を中心に振動すると考えられる。そこで、仮に界面張力を100倍と仮定し、電磁場を印加したときの定性的な挙動を検討した。その結果をFig.13に示す。溶鋼湯面はNS期の記号3の時期で隆起するが、凝固シェル先端への溶鋼のオーバーフロー、さらに鑄片表面での周期的凹凸を生じさせる現象は起こらず、OSMが消失する現象が記述できる。つまり、OSMの消失には溶鋼/フラックスの界面に作用するバネ力で表される電磁気力が深く関わっていることが推測される。また、平均的な流路幅はFig.11とFig.13でほぼ同等であり、OSM消失の現象は電磁気力により流路幅が必ずしも拡大しなくても起こり得ることが分かる。電磁場との結合は今後の課題である。電磁場印加に伴

う湯面形状の隆起は溶鋼湯面の平衡形状が変わるだけでFig.13の計算結果に質的に新たな変化は現れないと考えられる。熱的影響は流路幅が拡大するなどFig.13と異なる変化が現れることが考えられる。

7. 結言

溶鋼湯面近傍に高周波電磁場を印加して鑄型内の初期凝固を制御する連続鑄造プロセスの開発を行うため、試験連続鑄機を用いた鋼の鑄造実験および解析により、以下のことが判明した。

(1) コイルに流れる電流の共振周波数を検知して湯面レベル制御を行う新しい湯面レベル制御法 (RFLC法) を提案し、電磁場存在下において機能することを確認した。

(2) 上記の湯面レベル制御により正確に湯面レベルを保持して、高周波電磁場を印加した鑄造実験を行った結果、鑄片の表面性状を改善できることを確認した。この効果は高周波出力、および湯面レベルに顕著に依存することが判明した。

(3) 鑄型上端のスリットを連結した結果、鑄片にはスリット部への湯差しの痕跡は全く認められず、鑄型剛性を高められることが判明した。

(4) 湯面近傍における溶融フラックスおよび溶鋼の自由表面および自由界面を考慮した熱的、流体力学的検討を行った結果、電磁気圧の効果界面張力の増加で近似することにより電磁場印加による表面性状の改善を記述できることが分かった。

記号

- A : 鑄型振動振幅の1/2 (m)
- B : 誘導磁場 (T)
- C : 共振回路のキャパシタンス (F)
- C_p : 溶鋼の比熱 (J/kg·°C)
- f : 鑄型振動周波数 (1/s)
- f_0 : 共振周波数 (Hz)
- F : ローレンツ力 (N)
- Fr : フルード数 (—)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- h : 鑄型—フラックス間の熱伝達係数 (J/m²·s·°C)
- ΔH : 凝固潜熱 (J/kg)
- J_0 : コイル電流 (A/m²)
- J_m : 溶融金属中に生じる誘導電流 (A/m²)
- J_s : スリットで分断された鑄型表面に生じる誘導電流 (A/m²)
- k : 溶鋼の熱伝導度 (J/m²·s·°C)
- L : 共振回路のインダクタンス (H)
- Mo : モルトン数 (—)
- Nu : ヌッセルト数 (—)
- Pr : プラントル数 (—)
- Re : レイノルズ数 (—)
- S : ストローハル数 (—)
- T_0 : 鑄型温度 (°C)
- T_1 : 流入する溶鋼温度 (°C)
- T^* : 無次元化溶鋼温度 (°C)
- ΔT : 溶鋼温度と鑄型温度の差 (°C)
- V_c : 鑄造速度 (m/s)
- We : ウェーバー数 (—)
- Y : ヤコブ数 (—)

- ν : 溶鋼の動粘度 (m^2/s)
 ρ : 溶鋼の密度 (kg/m^3)
 σ : 溶鋼—溶融フラックス間の界面張力 (N/m)

文 献

- 1) 鷺見郁宏, 佐々健介, 浅井滋生: 鉄と鋼, **78** (1992), 447.
- 2) 竹内栄一, 籾 健彦, 北條優武, 竹内英麿, 河合浩之, 松村省吾: 材料とプロセス, **6** (1993), 1125.
- 3) 中田 等, 小北雅彦, 森下雅史, 綾田研三, 蝦名 清: 鉄と鋼, **80** (1994), 711.
- 4) 中田正之, 西岡信一, 大迫隆志, 森健太郎, 佐藤俊雄, 沖本伸一: 鉄と鋼, **82** (1996), 1005.
- 5) M.Yoshida, S.Furuhashi, S.Suehiro and T.Tanaka: Proc.of 7th China-Japan Symposium on Science and Technology of Iron and Steel, ChSM, Beijing, (1995), 211
- 6) 佐々健介, 李 廷拳, 浅井滋生: 鉄と鋼, **79** (1993), 1075.
- 7) 吉田 勝, 古橋誠治, 奥田美夫, 田中 努, 渡部忠男, 田中正仁: 材料とプロセス, **5** (1994), 901.
- 8) 田中 努, 高谷幸司: 材料とプロセス, **2** (1989), 1263.