

交流磁場印加連鑄モールドにおける 鑄片の表面性状に及ぼす動的なメニスカス挙動

佐々 健介*・李 廷挙*²・浅井 滋生*

Dynamic Meniscus Behavior Influencing on Surface Condition of Products Cast in Continuous Caster with Alternating Magnetic Field Applied from the Outside of a Mold

Kensuke SASSA, Ting-ju LI and Shigeo ASAI

Synopsis : In order to understand the meniscus behavior in the pool of a continuous caster with high frequency magnetic field applied from the outside of the mold, a model experimental work was conducted by using molten gallium which has a low melting point (301.8K). The terms meniscus height, meniscus depth and intermittently contacting distance are newly defined and measured for precise study of the state of contact between the mold and molten metal. Contacting pressure between the metal and the mold was calculated and the dynamic meniscus behavior was measured in different relative positions of the coil and the molten metal surface. The meniscus oscillating conditions to provide a good surface quality were estimated by examining the relationship between the surface roughness of a cast tin and the dynamic meniscus behavior. It was found that the meniscus is not stationary but repeats an intermittently contacting between the mold and the metal. The intermittently contacting distance, the meniscus height and the meniscus depth can be controlled by the magnetic field intensity and the relative position of the coil. It is estimated that the intermittently contacting behavior plays an important role in improving the surface quality of cast ingots.

Key words : electromagnetic processing of materials ; electromagnetic metallurgy ; application of high frequency magnetic field ; solidification ; continuous casting ; surface quality ; oscillation mark ; intermittently contacting distance.

1. 緒言

連鑄の凝固初期過程で発生する表面欠陥を電磁気力を利用して低減することを目的として、モールドの外側より磁場を印加する新しいタイプの電磁鑄造法の研究が最近活発に行われるようになってきた^{1)~10)}。先に著者ら⁸⁾は溶鋼の鑄造を想定して鋼に匹敵する密度の錫を用いたモデル実験を行い、高周波磁場を黒鉛製モールドの外側より印加することにより鑄片の表面性状を大幅に改善できることを明らかにした。そして、そこでは実験結果と理論解析から、溶湯とモールド壁との軟接触状態¹¹⁾の把握が重要であることを指摘した。

本研究では前報⁸⁾で指摘した初期凝固現象にまつわるモールドと鑄片との軟接触状態の把握を目的として、常温で溶融状態を保つガリウム（融点301.8K）を用いてメニスカスの動的挙動を詳細に調べた。まず、メニスカスの高さ、深さ並びにモールドと溶湯との間歇接触距離を新たに定義し、それらの測定を行った。また、電磁場の数値解析によってメニスカス深さを理論的に算出し、コイルと溶湯表面の相対位置がメニスカス挙動に及ぼす効果を明らかにした。最

後に、錫を用いた鑄造実験も行い鑄片の表面性状とメニスカス挙動の関連について比較検討を行った。

2. 実験装置および方法

2・1 メニスカス挙動および湯面波動特性の測定

実験装置の概略図をFig. 1-a, 1-bに示す。1-aは全体図を示しており、A部を矢印(A→)の方向から見た外観図とB部の穴の取り合いをそれぞれ1-bのA, Bに示す。まず、モールド外壁に幅7mm、深さ10mmの溝を掘りFig. 1-bのBに示すように0.4mm径の穴を上2つは2mm間隔で、それ以下は0.8mm間隔(穴と穴との最隣接距離0.4mm)で15個開け、その穴にガラス棒を挿入して溶湯の漏れを防いだ。室内の光を消した後、溝内壁に印画紙を張り付け溶湯の上方からモールドと溶湯の間隙に光を5秒間照射し、これを現像して得られる印画紙の感光跡よりメニスカス深さを計測した。この方法を、印画紙感光法と呼ぶことにする。また、Fig. 1-bのAに示すようにモールド壁に1mm径の穴を1.5mm間隔に3列、各列の穴の間隔は0.8mmとして作穴し、そこに0.4mm径の銅線を通した外径1mmの絶縁管を挿入

平成4年12月21日受付 平成5年5月14日受理 (Received on Dec. 21, 1992; Accepted on May 14, 1993)

* 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464-01)

* 2 名古屋大学大学院生 (Graduate Student, Nagoya University)

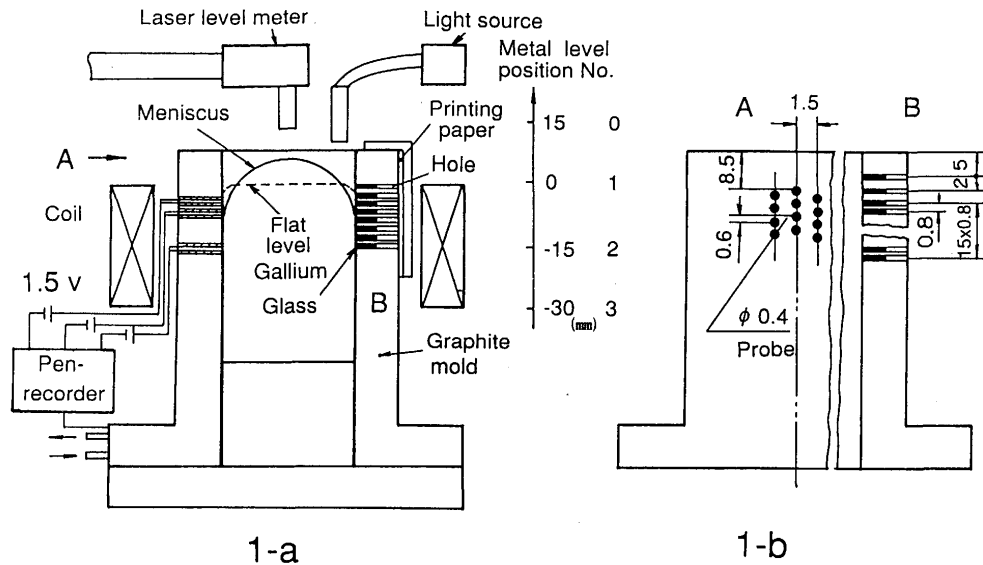


Fig. 1. Experimental apparatus.

1-a : Arrangement of measuring equipments.

1-b : Design of rows of holes for electric sensors and transmitting light.

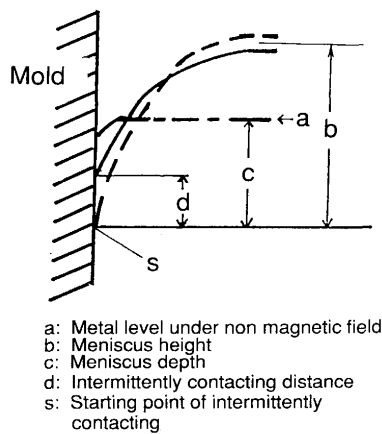


Fig. 2. Schematic diagram of meniscus height, meniscus depth and intermittently contacting distance.

した。銅線の一端をモールド内壁面に面合せしたうえで、他端は順次、電池、記録計、黒鉛モールドへと接続した。すなわち、メタルとモールドが接触するモールド-溶湯-埋込み銅線-電池-記録計の回路が形成されることを使って、0.2mm間隔でモールドと溶湯との接触状況の経時変化を求めるもので、これを接触通電法と呼ぶことにする。なお、モールドおよびコイルのサイズの詳細についてはFig. 3に示す。

メニスカス高さ(湯面最高点と溶湯-モールド完全接触点までの距離)、メニスカス深さ(磁場を印加しない場合の静止湯面レベルから溶湯-モールド完全接触点までの距離)、間歇接触距離(溶湯と鋳型が接触・剥離を繰り返す区間の距離)を定義しFig. 2に模式図として示す。メニスカス高さ

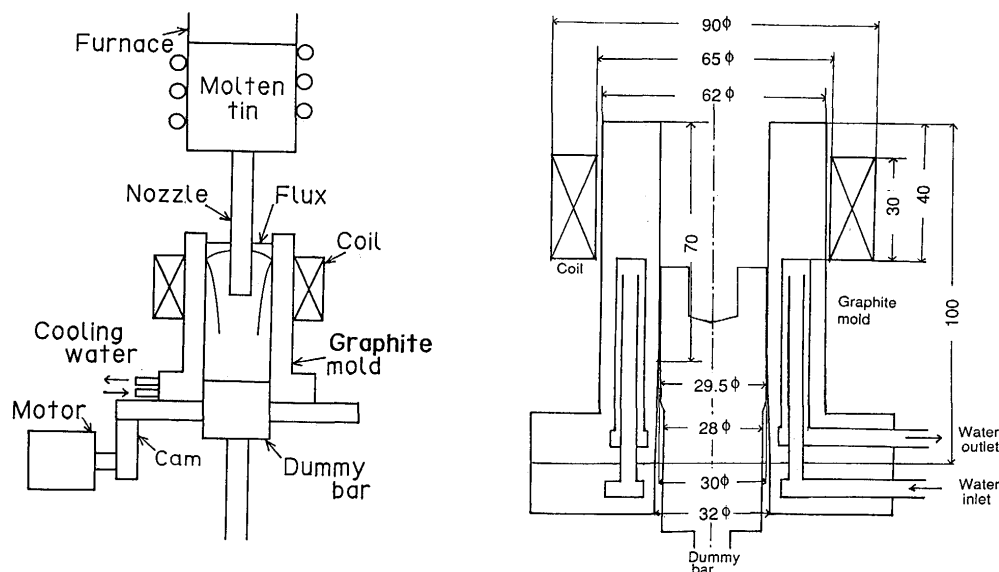


Fig. 3. Experimental apparatus for continuous casting and dimension of mold and coil.

および湯面波動特性はレーザー変位計を、メニスカス高さおよび間歇接触距離は印画紙感光法および接触通電法を用いてそれぞれ測定した。そして、メニスカス高さおよび深さと間歇接触距離に及ぼするつばとコイルの相対位置（湯面がコイルと一致する場合を湯面位置1として湯面位置関係をFig. 1-aに示す）、電源の周波数、磁束密度およびフラックスの影響について調べた。

2.2 鑄造実験

Fig. 3に示す装置において黒鉛製モールド（電気抵抗値： $900\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ）を用いて錫（ $\rho=7200\text{kg/m}^3$ ）の連続鑄造モデル実験を行った。まず、モールド上部に設置した炉で錫を融解し、浸漬ノズルを介してモールド内（内径30mm）に注湯した。モールド内に溶湯が50mm程溜った時点でダミーバーを下方に移動させて鑄造を開始し、メニスカスの位置が所定の位置に一致するまで漸次湯面レベルを上げ、その後、定常鑄造を行った。なお、擬似フラックスとしてシリコンオイルを用いてフラックスの効果を調べる実験も併せて行った。

3. 実験結果

3.1 メニスカス高さおよび深さの測定

磁場を印加していない状態下での湯面高さとコイル位置の相対関係をFig. 1-aに示す。湯面位置2に湯面を置いて中央部の湯面変動をレーザー変位計で測定した結果をFig. 4に示す。なお、同図に示した印加磁束密度は周波数を3.65 kHzと一定にして空芯状態でコイルの中心部のz方向の値を示したものである。磁束密度の増大に伴って湯面レベルとその変動振幅が大きくなっているが、波動の周期には大きな影響は見られないことがわかる。湯面レベルの時間平均値と印画紙感光法で求まる最大光侵入距離より各磁束密度におけるメニスカス高さ（Fig. 2に示されるb）を求めた。周波数3.65kHzの場合のメニスカス高さに及ぼす磁束密度の効果をコイルと湯面高さの相対位置をパラメーターにとりFig. 5に示す。湯面位置1, 2の場合に湯面が最も高く、

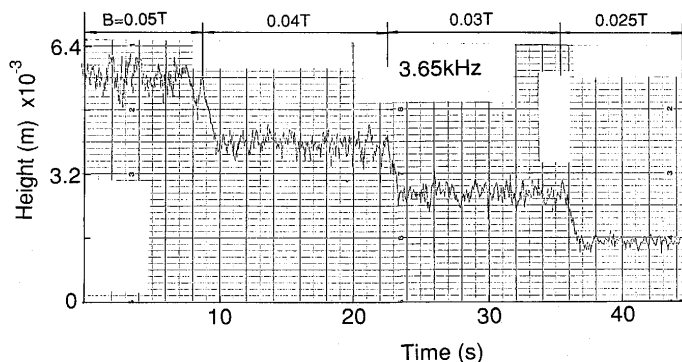


Fig. 4. Effect of magnetic field intensity on oscillating amplitude of molten metal surface.

湯面位置0の場合が最も低く、いずれの位置においてもメニスカス高さは磁束密度のほぼ2乗に比例するかたちで増加している。Fig. 6は湯面位置2にコイルを置き、周波数3.65 kHzとした場合のメニスカス深さ（Fig. 2に示されるc）に及ぼす磁束密度の効果を印画紙感光法で測定したものである。黒点はモールドに開けた穴を通して漏れた光が感光紙に写った跡である。先にも述べたとおり、上部二つの穴は2mm間隔で配され、それ以降の点は0.8mm間隔となっている。Fig. 6から磁束密度の増加に伴いメニスカス深さも増加していることがわかる。Fig. 7には湯面位置がメニスカス深さに及ぼす効果をパラメーターに磁束密度の値をとって

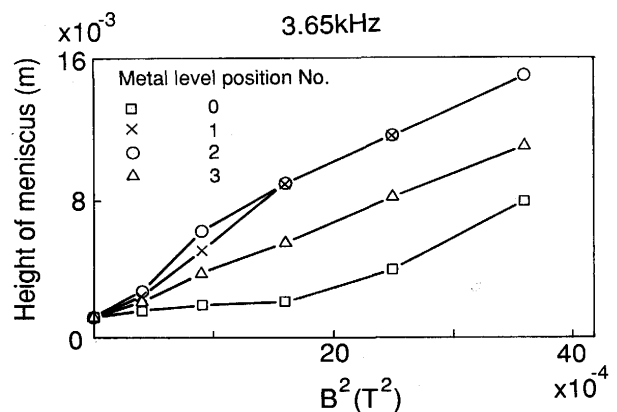


Fig. 5. Effect of square of magnetic field density on meniscus height.

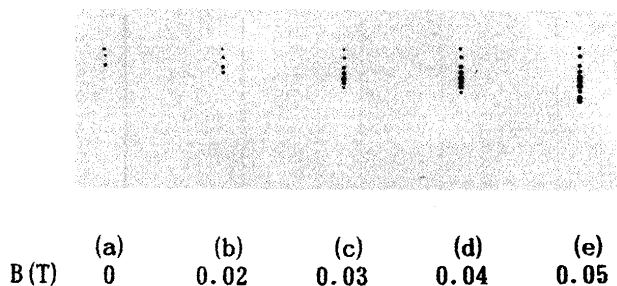


Fig. 6. Light spots indicating meniscus depth on a photoprint paper.

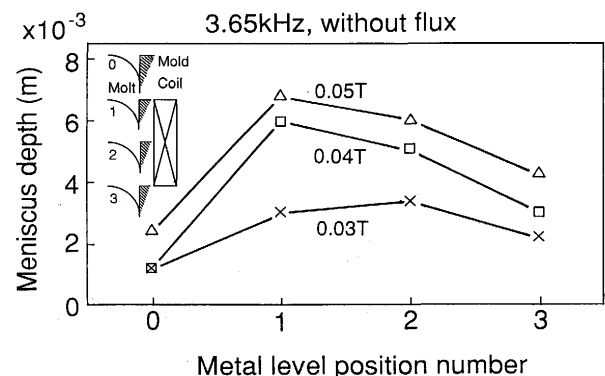


Fig. 7. Relationships between meniscus depth and metal level position in different magnetic intensities.

示した。湯面位置 1 の場合、メニスカス深さは最も大きくなっている。

3・2 間歇接触距離の測定

モールドと溶湯との接触状況を接触通電法により調べた。先に、間歇接触距離をモールドと溶湯が接触・剥離を繰り返す区間の距離と定義したが、それに従い、接触通電法では通電状態が時間的に変化する区間の距離としてこれを求めた。縦軸に非接触率、すなわち、全観測時間、 T_t 、に対する非通電の時間、 $T_{n.c.}$ 、の比を採り、横軸に基準面(磁場印加を行わない場合の静止溶湯表面)からの距離を採って、湯面位置 1 における両者の関係を Fig. 8 に示す。この図において縦軸上で 1 とはモールドと溶湯とが完全非接触状態に、0 とは完全接触状態にあることを示しており、1～0 の間にあるとき間歇接触状態にあり、その値が 1 に近いほどより接触時間が短いことを意味している。Fig. 9 にはフラックス添加が非接触率に及ぼす影響を示す。Fig. 8 と比較するとフラックスの添加は著しく完全無接触長さを増大させることがわかる。なお、ほぼ同様の現象は周波数が 1.73kHz の

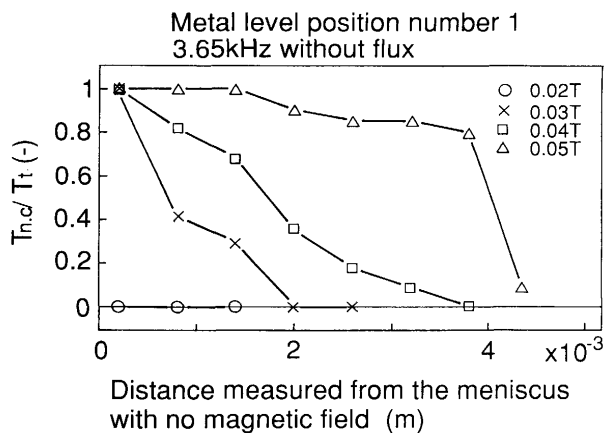


Fig. 8. Intermittently non-contacting time ratio along the distance measured from the meniscus point (without flux).

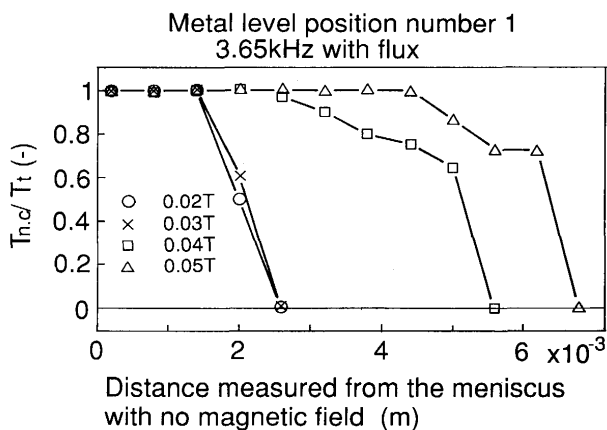


Fig. 9. Intermittently non-contacting time ratio along the distance measured from the meniscus point (with flux).

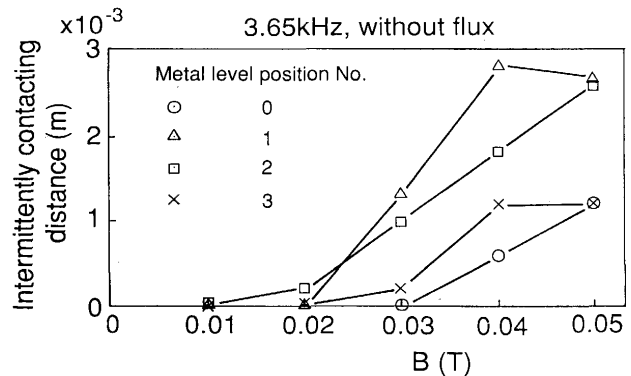


Fig. 10. Effect of magnetic field on intermittently contacting distance in the condition without flux.

場合にも観察された。

各コイル位置ごとに Fig. 8 に相当する図を描き、それらの図から得られる間歇接触距離と印加磁場の関係を湯面位置をパラメーターにして Fig. 10 に示す。いずれの位置においても磁束密度の増加により間歇接触距離が長くなっており、湯面位置 1 で磁束密度 0.04T～0.05T において、その距離が最も長くなっていることがわかる。

3・3 メニスカス表面波動特性の解析

磁束密度を 0.04T としレーザ変位計で測定したメニスカスの波動の平均振幅を周波数 1.73kHz の場合を Fig. 11 に、周波数 3.65kHz の場合を Fig. 12 に示す。同図の縦軸には湯面位置 2 において磁束密度 0.05T のときの時間平均振幅 σ_0 で各条件下での平均振幅の値を除して示した。また、これらの図には先に求めた間歇接触距離も併せて示した。間歇接触距離が長くかつ平均振幅が比較的小さいのは湯面位置 1 のときであることがわかる。湯面位置によって間歇接触距離、平均振幅が変化するのは、磁場分布の相違に伴う溶湯流動、磁気圧分布の変化によるものである。この点の詳細な検討には、メニスカス近傍での磁場分布および流動の非定常解

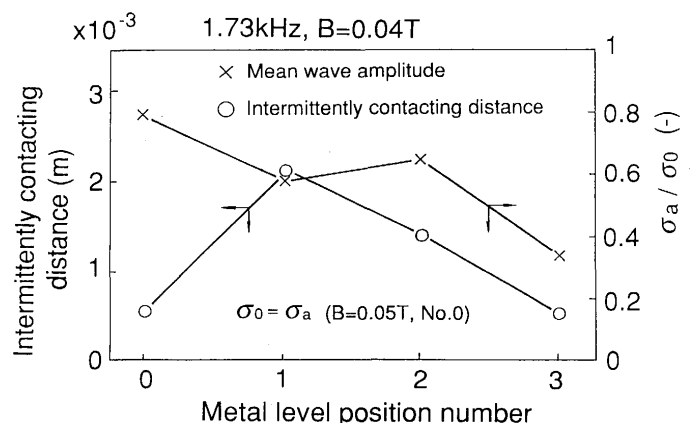


Fig. 11. Relationships between intermittently contacting distance and metal level position and between mean wave amplitude and metal level position (1.73kHz and B=0.04T).

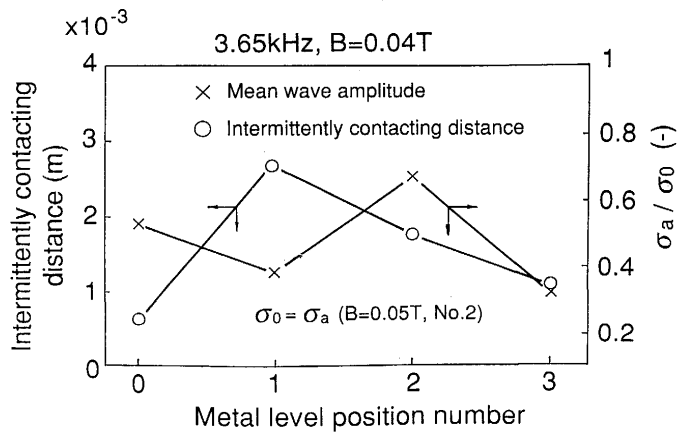


Fig. 12. Relationships between intermittently contacting distance and metal level position and between mean wave amplitude and metal level position (3.65kHz and $B=0.04T$).

析が必要と思われる。現時点ではFig.11とFig.12の結果の説明に定量的検討を加えるには至っていない。

3・4 鋳造実験結果

鋳片の表面性状に及ぼす湯面位置の影響を見るためにコイル電流を1400A(湯面位置1とした場合、コイル中心の z 方向磁束密度は0.04Tに相当する)と一定にし、連続鋳造実験を行った。鋳造速度は2.3m/s、オシレーションの周期および振幅はそれぞれ1.1Hzと4.0mmとし、模擬フラックスを添加した。また、オシレーションを加えない鋳造実験も併せて行った。Fig.13に得られた鋳片の表面写真を示す。aがオシレーションを加えた場合、bがオシレーションを加えない場合である。表面性状はどちらも湯面位置1における場合が最も優れており、磁場を印加しない場合が最も粗な面を呈している。磁場の印加を行わない場合に得られた鋳

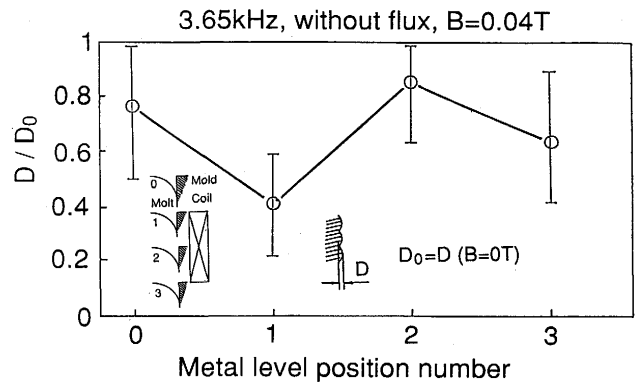


Fig. 14. Relationship between surface roughness and metal level position.

片の表面粗度の値で規格化した相対表面粗度と湯面位置の関係をFig.14に示す。この図からも明らかなように、湯面位置1の場合が最も表面性状が改善されていることがわかる。ここで、溶湯にガリウムを用いて引き抜きを行わず、かつオシレーションを加えない実験条件下で測定したメニスカス挙動に関する結果と引き抜きを行い、かつオシレーションを加えた場合に得られた鋳片の表面性状との関連性を述べる。当初、オシレーションを加えた場合と加えない場合とではメニスカスとモールドとの接触挙動において磁場印加の効果が異なって現れるものと予測したが、Fig.13で見られるかぎり鋳片の表面性状はオシレーションを加えた場合と加えない場合とではほぼ同じであり、磁場印加の効果と湯面位置の効果がより顕著に現れる結果となった。このこととFig.12の結果(間歇接触距離は湯面位置1で磁束密度0.04Tのときが最も長く、かつ平均振幅は小さくなっている)との照合結果から間歇接触距離が長く、かつ表面波動の平均振幅が小さいことが表面性状改善につながることをうかがわせる。

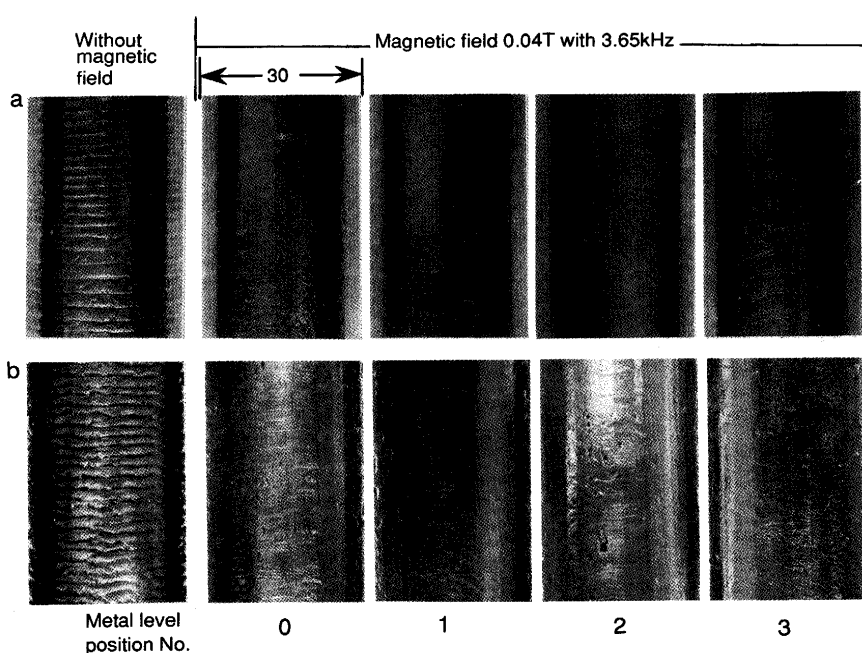


Fig. 13. Surface condition of cast billets.
a : with oscillation
b : without oscillation

4. 数値解析

この数値解析の手法および基礎式と境界条件は前報⁸⁾と同じである。すなわち、マックスウェル方程式から導出される磁場の拡散方程式を磁気ベクトルポテンシャルを導入して記述し、それを実験系に合わせた境界条件のもとで有限要素法を採用して数値解析した。計算に当たっては、三角要素を用いて格子数1500、要素数3000とし湯面位置をFig. 1に示したように、0、1、2、3と変化させて計算を行った。湯面位置1において計算で求まる磁気圧の分布と溶湯静圧、および、新たに定義した接触圧(≡(溶湯静圧)−(磁気圧))をFig.15に示す。磁気圧が溶湯静圧を上まわり接触圧が負値を示す距離が見られるが、計算では溶湯の形状変化および振動はないものとしているため、これがFig. 2で定義したメニスカスのどの距離に相当するか決めることはできない。Fig.16には計算によって得られた接触圧が負値を示す距離と共に、実測されたメニスカス高さ、メニスカス深さおよび間歇接触距離の実測結果も示した。接触圧が負値を示す距離は印画紙感光法で求めたメニスカス高さとはほぼ一致するものとなった。

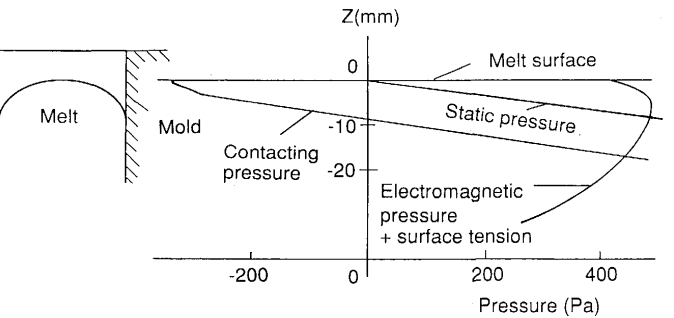


Fig. 15. Calculated distribution of static, electromagnetic and contacting pressures.

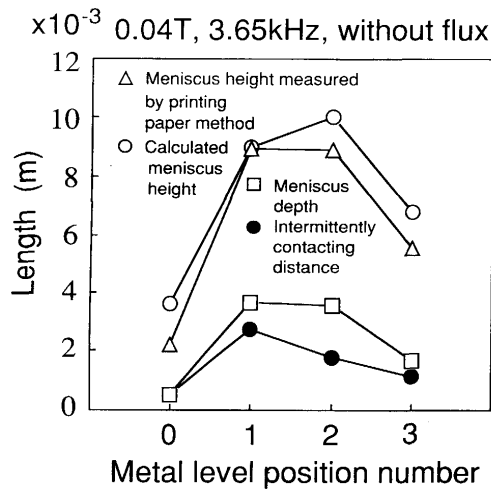


Fig. 16. Relationships of meniscus height, meniscus depth, intermittently contacting distance and the distance calculated as negative contacting pressure, to metal level position.

5. 考察

一般に、初期凝固過程が強冷却状態に置かれると、モールド表面での微視的な冷却斑が凝固収縮を介して助長されることになろう。すなわち、強冷却点で凝固が進むとそれに隣接する緩冷却点で凝固収縮に伴う残溶湯の収縮が生じ、モールドとの接触状態が悪化する。その結果、表面冷却状態の不均一化が益々助長され表面性状は悪化するものと考えられる。一方、緩冷却状態に置かれた場合には凝固収縮も緩やかなものとなり、表面冷却状態の斑が冷却面に平行な方向の伝熱によって均一化されるので、表面性状の優れた铸片が得られるものと考えられる。本铸造実験結果(Fig. 13)から初期凝固シェルの形成過程はメニスカス形状およびモールドとの接触状態を介して铸片の表面性状に大きくかわっていることが推察された。その際、モールド外側より磁気圧を印加すると間歇接触状態が作り出される。この間歇接触距離が長いと溶湯とモールドとの接触が長距離にわたって繰り返行われ緩冷却状態が作り出されよう。間歇接触距離が短くメニスカスが急冷され凝固シェルが急激に厚くなる状況下では凝固収縮の緩和がなされず、溶湯とモールドとの接触時の湯面の乱れがそのまま表面状態に反映される。その結果、表面性状の悪化を招くことが想像される。すなわち、湯面の位置番号が0、2、3の場合には間歇接触距離が短く、そのため湯面の乱れがそのまま初期凝固シェル形成に反映され表面性状の悪化につながったものと推察される。アルミニウムの分野で採用されているホットトップ铸造は距離的な意味の初期凝固面の緩冷却を作り出すのに対し、長い間歇接触距離は時間的な意味の初期凝固部の緩冷却を生じせしめるものと考えられる。また、Fig. 9に見られるごとくフラックスを添加した場合、メニスカス深さが大きくなっているが、これはフラックスを介する伝熱という意味で緩冷却に結びつくのみならず、間歇接触状況を変えるという二重の意味で緩冷却作用に寄与するものと推察できる。モールドの外側より電磁気力を印加することはメニスカス部での溶湯-モールドの接触状態に影響し得るという意味では、フラックス添加に類似する作用を有することがわかる。従来、メニスカス部での熱流速の制御変数としてもつばらフラックスの種類とオシレーションの振動モードが採り上げられた数多くの検討がなされてきたが、電磁気力印加も新しいメニスカス部制御の一変数と考えることができよう。

以上、連铸片表面性状に及ぼすメニスカス挙動を述べてきたが、同様のことは連铸型コールド・クルーシブルの場合にも言えるのではないかと推論する。また、優れた表面性状を得るためにはFig.12に見るごとく、溶湯表面変動を小さく採る必要があることも見逃せない。このことは、Fig. 2の間歇接触起点Sの変動の小さいことを意味している。今後、表面波動特性と初期凝固シェル発生点およびシェルの

発達状況，さらに磁場印加がもたらす溶湯，モールドおよび鑄片表面の発熱と表面欠陥の関連について，実験的および理論的な検討を進める必要がある。

6. 結言

連鑄鑄片の表面性状改善を目的として，モールド外側より磁場を印加するモデル実験を行い溶湯の表面波動特性，メニスカスの高さおよび深さおよび間歇接触状況に及ぼす磁束密度，周波数およびコイルと溶湯表面の相対位置の影響を調べた。その結果，以下に示す知見を得た。

1. メニスカスは静止しているのではなく，常に振動を伴いモールドとの接触・剝離を繰り返す間歇接触状態にある。

2. 間歇接触距離およびメニスカスの高さおよび深さは印加磁場および湯面－コイル間の相対位置によって大幅に変化することを理論解析とモデル実験によって確かめた。

3. 磁場印加によって間歇接触距離を大きくすることは時間的な緩冷却状態を生み，鑄片の表面性状改善につながる。

4. フラックスの添加はメニスカス挙動の変化を生じ緩冷却効果をもたらす。

5. 表面波動の抑制は間歇接触起点の変動を抑え，安定した初期凝固殻の形成に結びつく。

本理論解析に際し，ご助言を賜りました名古屋大学工学部桑原守氏およびプログラムの作成にお骨折りをいただきました驚見郁宏氏（現：NKK鉄鋼研究所）に感謝申し上げます。

文 献

- 1) Ch.Vives and R.Ricou: Metall. Trans. B, **16B** (1985), p.377
- 2) Ch.Vives and R.Ricou: Metall. Trans. B, **20B** (1989), p.623
- 3) I.Miyosino, E.Takeuchi, H.Yano, J.Sakane, T.Saeki and H.Kajioka: ISIJ Int., **29** (1989), p.1040
- 4) E.Takeuchi, I.Miyoshino, H.Kawai, K.Tsunenari and J.Sakane: Proc. the 6th International Iron and Steel Congress, Nagoya Japan., Vol.4 (1990), p.408
- 5) 驚見郁宏，佐々健介，浅井滋生：材料とプロセス，**4** (1991), p.25
- 6) 大迫隆志，森健太郎，中田正之，佐藤俊雄，小松政美，河井良彦：材料とプロセス，**4** (1991), p.26
- 7) 浅井滋生，佐々健介，驚見郁宏：学振19委-No.11271 (平成3年9月)
- 8) 驚見郁宏，佐々健介，浅井滋生：鉄と鋼，**78** (1992), p.447
- 9) 中田正之，大迫隆志，森健太郎，佐藤俊雄，小松政美，河井良彦：材料とプロセス，**4** (1991), p.952
- 10) 藤 健彦，竹内栄一，金子克志，恒成敬二，坂根淳一：材料とプロセス，**4** (1991), p.953
- 11) 浅井滋生：第129・130回西山記念技術講座（日本鉄鋼協会編），(1989), p.51