

高周波磁場による鋼の初期凝固制御

中田 正之*・西岡 信一*・大迫 隆志*²・森 健太郎*・佐藤 俊雄*³・沖本 伸一*⁴

Control of Initial Solidification of Steel by Application of High Frequency Magnetic Field

Masayuki NAKADA, Shin-ichi NISHIOKA, Takashi OSAKO, Kentaro MORI, Toshio SATO and Shin-ichi OKIMOTO

Synopsis : This research work was conducted to find the possibility of controlling the initial solidification in the continuous casting processes with the triple point by applying high frequency electromagnetic field. Some continuous casting processes such as the horizontal continuous casting have the triple point defined as the intersection of a refractory, a mold and molten steel. Since the triple point has a role of initiating solidification shell, proper initiation of solidification at the point is required. The imposition of high frequency electromagnetic field on the triple point was investigated to achieve the appropriate solidification control.

First of all, numerical calculations were done to estimate the magnetic pressure and the joule heat. Then, bench scale experiments and plant tests with the horizontal continuous caster in Keihin Works were carried out. An induction coil was installed around the triple point and driven at 3kHz in both cases. For the bench scale experiments, 250kg of plain carbon steel was cast into a round billet with 65mm in diameter, and for the plant tests 50t of high carbon steel was cast into billets with 330mm in diameter. The cast surface appearance and subsurface solidification structure were examined. Without electromagnetic field, the triple point defects such as rough surface and irregular subsurface solidification structure appeared on the cast. On the other hand, almost no such defects were observed.

Better bonding between the shell tip and the molten metal near the triple point was supposed to be promoted by the electromagnetic field.

Key words : high frequency electromagnetic field ; initial solidification ; horizontal continuous casting ; surface quality ; magnetic pressure ; joule heat.

1. 緒言

近年、連続鋳造プロセスの高効率化および品質の高級化への要求の高まりにともない、初期凝固を適切に行うための技術開発が様々な観点から進められている。中でも、1980年代後半より国内において鋼の連鋳プロセスへの応用を目指して、鋳型内の初期凝固制御¹⁻⁵⁾や溶鋼流動制御⁶⁾等を狙った各種の電磁力の利用技術の開発が進められてきた。

連鋳機には鋳型内にメニスカスが存在して凝固の開始点がメニスカス位置に一致するタイプのもと、水平連鋳機⁷⁾やストリップキャスター⁸⁾等のように耐火物と鋳型が直結しているタイプのものがある。後者は、例えば水平連鋳機の場合、ブレイクリングと称する耐火物が鋳型の入り口に設置され、その接点から凝固が開始される。この場合、水冷銅鋳型、耐火物および溶鋼の3要素の接点(以下3重点と称する)での初期凝固制御が、鋳片表面性状に大きく影響するものと考えられる。

本報告は、表皮効果により溶湯表面に磁場が集中しやす

い高周波磁場を印加して、3重点を有する種々の連鋳機の初期凝固制御の可能性を基礎的に調査する事と、実機の水平連鋳プロセスの初期凝固制御の可能性を調査したものである。

2. 数値解析による磁気圧力および発熱量の推定

実験に先だって、高周波磁場を印加した際の効果を推定するために、数値解析により3重点周辺に加わる磁気圧力とジュール熱を求めた。この場合、Fig. 1に示す小型実験用の連鋳機、3重点シミュレータを想定して計算した。この3重点シミュレータは、水冷銅鋳型の上部に耐火物製のスリーブが設置され、そのスリーブの背後のできる限り3重点に近接する位置に、水冷の銅製コイルが設置され、高周波磁場を印加しつつ鋳造を行うものである。

計算は、円筒座標系で、マックスウエルの方程式にベクトルポテンシャルAとスカラーポテンシャルφを導入して変換した(1)式を差分化して磁束密度Bを求め、次いで磁気圧

平成8年6月12日受付 平成8年9月9日受理 (Received on June 12, 1996; Accepted on Sep. 9, 1996)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1 Kokanmachi Fukuyama 721)

* 2 東永金属工業(株) (Toei Metals Co.Ltd.)

* 3 富士化工(株) (Fuji Kako Co.Ltd.)

* 4 NKK京浜製鉄所 (Keihin Works, NKK Corp.)

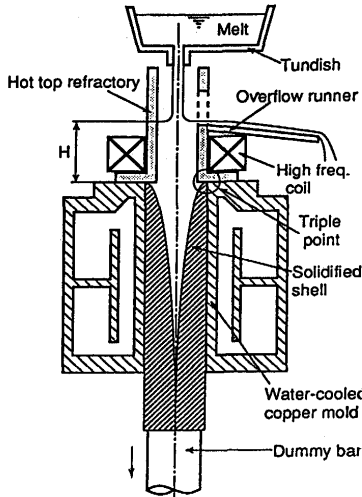


Fig. 1. Triple point simulator for investigation on control of initial solidification by high frequency magnetic field.

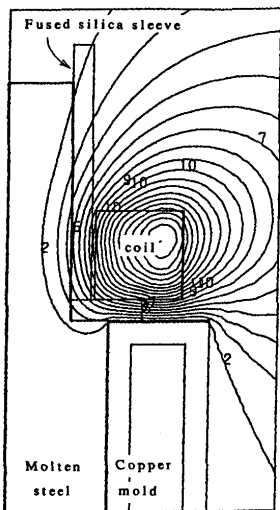


Fig. 2. Calculated magnetic flux distribution in the triple point simulator. (Coil current : 3kA, Frequency : 3kHz)

力の計算にはマックスウエルの応力テンソル⁹⁾を用いて求めた。また、ジュール熱の計算も誘導電流の電流密度の計算をもとに行った。

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\mu r} \cdot \frac{\partial (rA)}{\partial r} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{1}{\mu r} \cdot \frac{\partial (rA)}{\partial z} \right\} = -J_{\theta} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \dots\dots\dots (1)$$

- r : 半径方向の距離, A : ベクトルポテンシャル
- μ : 透磁率, z : 上下方向距離
- J_θ : 誘導電流, σ : 電気伝導度, t : 時間
- φ : スカラーポテンシャル, θ : 角度

Fig. 2 にコイル電流3000A, 電流の周波数 3 kHz の条件で得られた磁場分布の例を示す。計算の際の諸条件はSatoが行ったものを参照されたい¹⁰⁾。水冷銅鑄型は電気伝導率が高いため、ほとんど磁場は浸透せず、溶鋼に浸透した磁場は3重点近傍に集中している事が分かる。また、Fig. 3 は3重点周辺の磁気圧力の垂直成分, 水平成分の分布を求めた結果を示したものである。垂直, 水平成分とも耐火物, 水冷銅鑄型, 溶鋼の接点付近で大きくなっている。また、同図中には溶鋼ヘッドが50mmの場合の溶鋼静圧に等しいベク

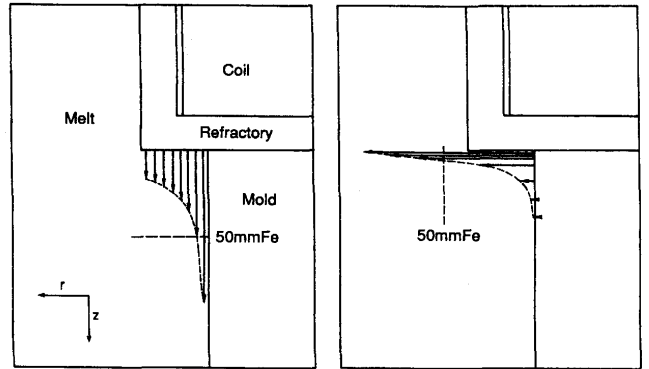


Fig. 3. Calculated magnetic pressure onto melt surface in the vicinity of the triple point. (Coil current : 3kA, Frequency : 3kHz)

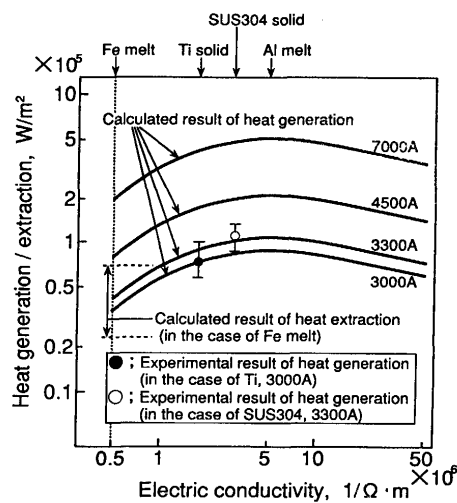


Fig. 4. Relation between heat generation and electric conductivity.

トル長さが示されているが、約90mmの溶鋼ヘッドとはほぼ等しい磁気圧力が3重点付近に発生する計算結果となった。Fig. 4 は3重点におけるジュール熱の発生量を求めた結果を示す。同図中には、実機の水平連鑄機のブレークリングからの抜熱速度を伝熱計算から求めた例を示すが、0.3~0.7 W/m²程度の値¹¹⁾となり、コイル電流の設定条件によっては、3重点周辺の耐火物からの抜熱よりジュール熱の方が上回る場合があることが分かる。なお、ジュール熱の計算の精度を確認するため別途行った発熱量の測定実験の結果¹²⁾も同図中に示すが、電気伝導率が異なる固体のTi, SUS304でほぼ実験と計算が一致する事から本計算の精度は十分に高いと推定される。

3. 鑄造実験条件

3.1 小型実験

高周波磁場による鋼の初期凝固に及ぼす影響を基礎的に調査するために、250kgの溶鋼を用いた小型実験を行った。溶鋼は真空溶解炉を用いて、炭素含有量が0.20%~0.24%に調整されたアルミキルド鋼であり、取鍋に出鋼した後、その取鍋を3重点シミュレータ上に設置しタンディシュを經由して鑄型内に注湯される。3重点シミュレータのイメ

ージをFig. 1に示すが、内径65mmの水冷銅鑄型上部に溶融シリカ製のスリーブが設置され、スリーブのオーバーフロー位置の高さにより溶鋼ヘッドが実験中維持される構造になっている。この実験設備では耐火物と水冷銅鑄型および溶鋼の接点の3重点から凝固が開始され、この3重点における凝固の開始を高周波磁場の印加により制御を試みる。高周波磁場印加の際、誘導電流との相互作用による磁気圧力で溶湯表面を耐火物の壁から引き離す効果と、ジュール熱による凝固シエルと溶湯の溶着性の向上効果が期待される。また、鑄片の引き抜きはダミーバーを介して行われるが、目的に応じて連続引き抜きまたは間歇引き抜きが行われる。Table 1に溶鋼組成、高周波発振機による磁場印加条件、Table 2に鑄造条件を示す。鑄造条件は、上述の数値計算で得られた磁気圧力の値を参考にして、低ヘッドの実験(3重点~オーバーフローまでの距離、ヘッド高さH=約60mm)と高ヘッドの実験(ヘッド高さH=120mm)に分類されるものとした。

3・2 実機の水平連鑄機での試験

3・2・1 水平連鑄機での試験条件

水平連鑄機では、タンディッシュ/モールドが直接接合されており前述の3重点シミュレータと同様に3重点が存在し、ここでの初期凝固を適正に制御する事が鑄片の品質と操業の安定化のために重要である。そこで、京浜製鉄所で稼働中の水平連鑄機に高周波磁場発生用の設備を設置し、炭素含有量が0.40%のアルミキルド鋼、溶鋼量50tを用いた試験を実施した。Table 3に主な試験条件を示す。鑄片のサイズは330mmφであり、鑄造速度は0.9m/min、鑄片の引き抜きは65または85cpmの間歇引き抜きを行った。タンディッシュ内の湯面から鑄型中心までの距離(ヘッド高さ)は、定常部において約900mmであった。また、高周波磁場印加

Table 1. Chemical composition of melt and characteristics of high frequency current generator for triple point simulator.

Chemical composition of molten steel	C	Si	Mn	P	S	Sol.Al
	0.20 ~ 0.24%	0.25 ~ 0.26%	0.64 ~ 0.65%	0.026 ~ 0.028%	0.021 ~ 0.02%	0.034 ~ 0.037%
Amount of molten steel	250kg					
High frequency power supply	30kW, 3kHz					
Coil current	Max 4500 A					

Table 2. Casting conditions of triple point simulator.

	Low head	High head
Ferro static height	60mm	120mm
Casting speed	0.35m/min	0.75m/min
Withdrawal method	Continuous	Intermittent(60cpm)
Superheat in tundish	25 ~ 35 ° C	
Billet diameter	65 mm	

用の電源は最大出力260kWにおいて、3kHzの周波数の高周波電流を発生するものである。磁場発生用のコイルはFig. 5に示すようにフィードチューブ内に埋め込まれており、水冷されている。ブレークリングは通常の操業で用いられているβ-サイアロン製のものを使用した。また、鑄型は今回の試験用としてストレート鑄型を使用した。

3・2・2 鑄片の圧延試験条件

水平連鑄機での試験で得られた330mmの丸ビレットを、圧延を簡便にするために鑄造方向と平行な面において切断し、断面が三カ月状で幅中央部の最大高さ60mm、長さ600mmの試験片を作成した。その試験片を1200°Cにおいて5時間加熱し、幅中央部が20mmになるまで圧延する試験圧延を行った。圧延材の確性は幅中央部の最も変形を受けている部分の表層部の調査を行った。

4. 実験結果

4・1 小型実験の結果

4・1・1 低ヘッド実験の結果

水冷銅鑄型上の耐火物スリーブのオーバーフローから3重点までの距離が60mmの低ヘッドの実験結果について以下に説明する。鑄造速度は0.35m/minで、鑄片は連続的に引き抜きを行ったものである。

Fig. 6は得られた鑄片の表面外観を示す。左側の鑄片はコイルに通電しなかった場合のもので間隔が1~2mm程度の浅

Table 3. Test conditions for horizontal continuous casting.

Chemical composition of molten steel	C	Si	Mn	P	S	Sol.Al
	0.40 %	0.31 %	0.54 %	0.021 %	0.025 %	0.031 %
Amount of molten steel	50 ton					
Diameter of billet	330 mm					
Casting speed	0.9m/min					
Cycle of intermittent withdrawal	65 or 85 cpm					
High frequency power supply	260kW, 3kHz					
Superheat in tundish	45 ~ 49 ° C					

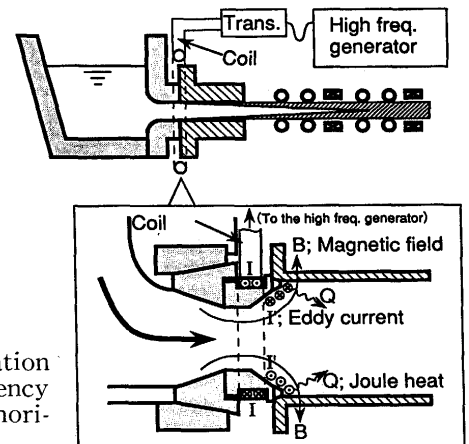


Fig. 5. Image of initial solidification control with high-frequency electromagnetic field in horizontal continuous caster.

いへこみと間隔が数mm~10数mm程度の深いへこみが周期的に存在している。また、右側の鑄片はコイルに4000Aの電流を鑄造中に通電し続けた例である。この場合、長い間隔の深いへこみは消失し短い間隔の浅いへこみに変化した。Fig. 7は鑄片の中心線を含む縦断面を飽和ピクリン酸腐食して得られた凝固組織を示す。左側はコイルに通電しなかった場合であり、長い間隔の深いへこみ部に対応してその直下に凝固組織の不連続な部分が存在する。しかしながら、コイルに4000Aを通電した場合、凝固組織の不連続は消失しかつデンドライトの1次アームの向きの乱れも解消した。Fig. 8には表層部の凝固組織の不連続な部分の厚みを測定した例を示すが、コイル電流が約4000Aで完全に消失する結果となった。

4.1.2 高ヘッド実験の結果

Fig. 9は溶鋼ヘッドが120mmの高ヘッドの場合の鑄片外観を示す。鑄造速度は0.75m/minで実機の水平連鑄機を想定して60cpmの間歇引き抜きを行ったものである。コイル電流が0Aおよび4500A共に間歇引き抜きのピッチに対応した周期的な軽度なへこみ(コールドシャットマーク)と、1mm程度の間隔の浅いへこみが存在する。コイル電流が0Aの場合、コールドシャットマークに沿ってクラックが存在する場が多いが、4500Aの場合はクラックは存在しない。Fig. 10は鑄片の縦断面の飽和ピクリン酸腐食した際の凝固組織

を示すものであるが、低ヘッドの場合とは異なりコイル電流印加の有無にかかわらず、凝固組織の不連続部が存在するのが観察された。しかし、コイル電流0Aの場合で凝固組織の不連続部に沿って微小なクラックが存在するが、コイル電流4500Aの場合では、凝固組織の不連続部のマイクロ偏析が存在するのみで、しかも軽微なものとなっている。また、同じく縦断面を希塩酸によるマクロ腐食を行ったところ、Fig.11に示すようにコイル電流0Aのもので凝固組織の不連続部のクラックに沿って深く溝が形成されるのに対し、コ

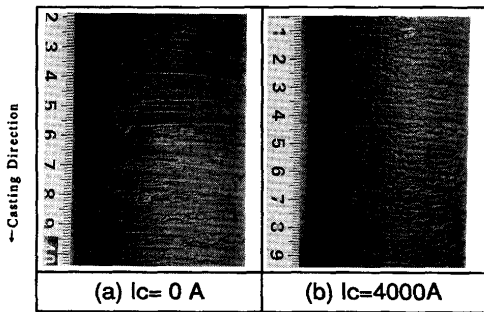


Fig. 6. Cast surface appearance by low head casting with the triple point simulator. (Casting speed : 0.35m/min, Coil current I_c : 0A, 4000A, Ferro static height : 60mm)

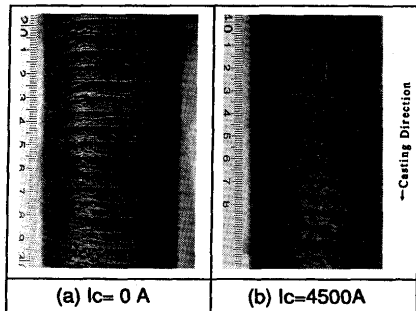


Fig. 9. Cast surface appearance by high head casting with the triple point simulator. (Casting speed : 0.75m/min, Withdrawal cycle : 60cpm, Ferro static height : 120mm)

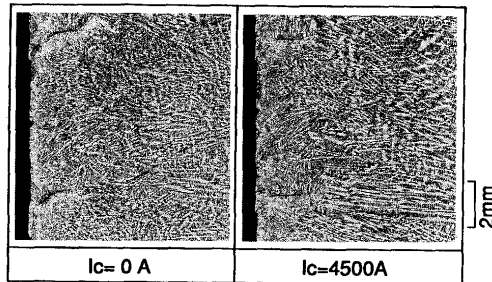


Fig. 10. Solidification structure in longitudinal section by high head casting. (Casting speed : 0.75m/min, Withdrawal cycle : 60cpm, Ferro static height : 120mm)

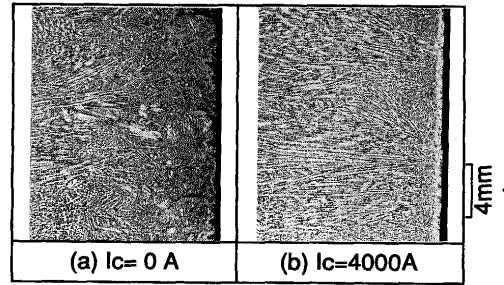


Fig. 7. Solidification structure in longitudinal section by low head casting with the triple point simulator. (Casting speed : 0.35m/min, Coil current I_c : 0 A, 4000A, Ferro static height : 60mm)

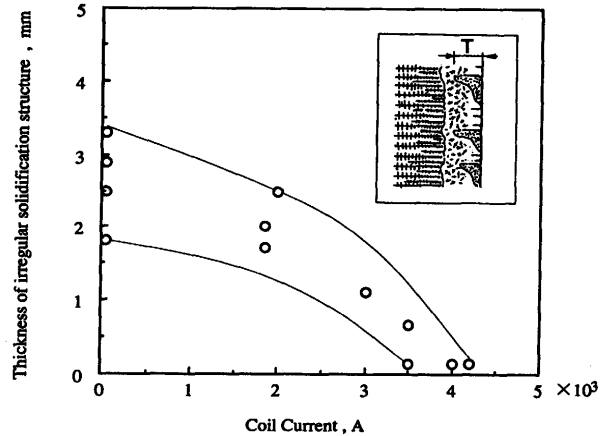


Fig. 8. Relation between coil current and thickness of irregular solidification structure. (Casting speed : 0.35m/min, Ferro static height : 60mm)

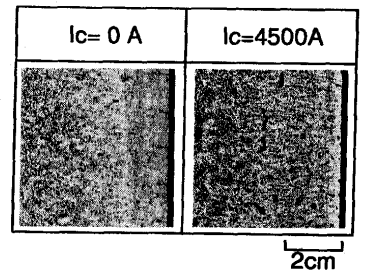


Fig. 11. Solidification structure in subsurface area in longitudinal section by high head casting. (Casting speed : 0.75m/min, Withdrawal cycle : 60cpm, Ferro static height : 120mm)

イル電流4500Aの場合はほとんど腐食による溝が形成されない事が分かった。

4・2 実機水平連続鋳機での試験結果

4・2・1 鋳片の表面品の改善効果

Fig.12に50tの試験鋳造を行った際の鋳片の軽酸洗後の外観を示す。鋳片は85cpmの間歇引き抜きを行ったものである。いわゆるコールドシャットマークが表面に存在するが、電源出力が260kWの場合でコールドシャットマークの厚みが薄くなっている。また、Fig.13にピクリン酸腐食で得られた鋳片縦断面のマイクロ組織を示す。小型実験で得られた鋳片に比べて鋳造時の冷却速度が遅いため凝固組織が明瞭ではないが、コイル電流を印加しない場合で3重点シミュレータと同様にコールドシャットマークの直下に凝固組織の不連続部に対応するマイクロ偏析が存在した。しかるに、260kWの出力の場合で、コールドシャットマーク直下の凝固組織の不連続に伴うマイクロ偏析がほとんど消滅している事が分かる。Fig.14はコールドシャットマーク直下に存在する微小なポロシティの大きさを測定した結果を示すが、磁場を印加したものにおいて、非常に軽微になっている事が判明した。なお、65cpmの間歇引き抜きを行った場合も同様な効果が確認されている。

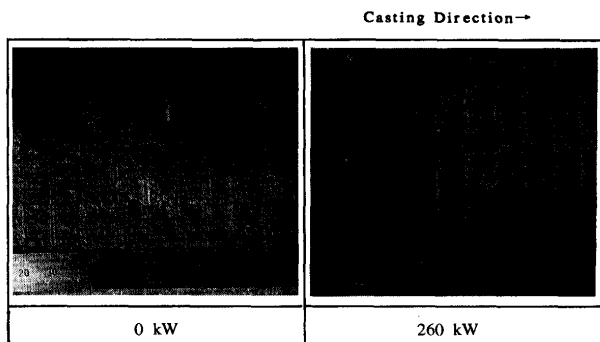


Fig. 12. Surface appearance of the cast billet with the horizontal continuous caster.
(Casting speed : 0.90m/min, Withdrawal cycle : 85cpm, Power of generator : 0kW, 260kW)

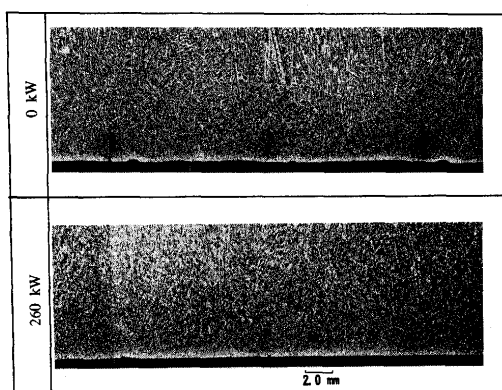


Fig. 13. Solidification structure in the subsurface area in the billet with the horizontal continuous casting.
(Casting speed : 0.90m/min, Withdrawal cycle : 85cpm, Power of generator : 0kW, 260kW)

4・2・2 鋳片圧延試験結果

Fig.15に鋳片の試験圧延を行って得られた試片の希塩酸腐食によって得られた、コールドシャットマークに対応する部分の表面および断面を示す。磁場を印加したもので、圧延後の表面にコールドシャットマークに対応するマイクロ偏析の模様が消失している事が分かる。

5. 考察

5・1 磁気圧力の効果

Fig. 3の磁気圧力の計算結果から低ヘッドの小型実験で得られた結果を考察すると、3重点に加わる磁気圧力は静鉄圧を上回る事が推定され、この場合Fig.16に示す様な現象が発生しているものと推定される。すなわち、磁気圧力が加わっていない場合、(A)、(B)でそのイメージを示すが、鋳片が下方に引き抜かれるにつれて耐火物スリーブと凝固シェル先端の間に溶鋼が侵入してくる。その際の溶鋼においては、鋳型への抜熱のみならず、耐火物スリーブと凝固シ

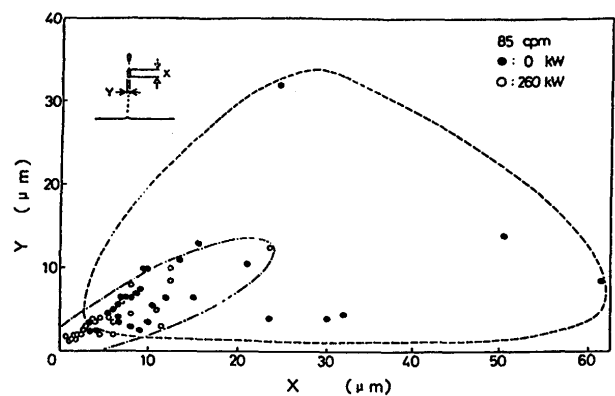


Fig. 14. The effect of the high frequency magnetic field on the size of the micro porosities beneath the cold shut mark.
(Casting speed : 0.90m/min, Withdrawal cycle : 85cpm, Power of generator : 0kW, 260kW)

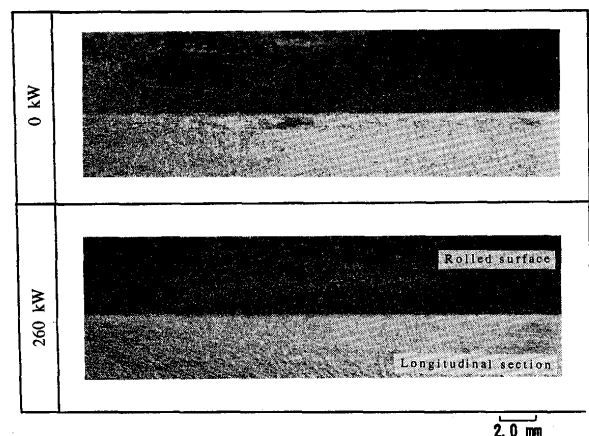


Fig. 15. The microstructures after rolling test in longitudinal section and rolled surface.
(Casting speed : 0.90m/min, Withdrawal cycle : 85cpm, Power of generator : 0kW, 260kW)

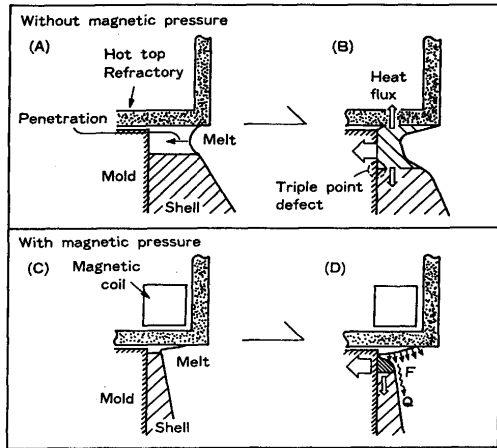


Fig. 16. Image of the mechanism concerning improvement of initial solidification by application of high frequency magnetic field in the triple point area.

エル先端への抜熱も発生しているものと推定される。この場合、耐火物側への抜熱により耐火物側にシェルが形成され、このシェルが下方に引き抜かれて次に溶鋼と接触する際に、溶鋼との溶着性が悪化するものと考えられる。一方、磁気圧力が溶鋼静圧より十分に高い場合、(C)、(D)に示すように3重点近傍で耐火物スリーブから溶鋼が磁気圧力により引き離される事で耐火物側への抜熱が低減され、耐火物側からのシェル成長が防止され、シェル先端への溶鋼の溶着性が改善したものと推定される。

従って、溶鋼ヘッドに比べて磁気圧力が十分に大きい場合、磁気圧力の効果を利用して3重点における初期凝固制御が可能と考えられる。

5・2 ジュール熱の効果

Fig.10の高ヘッドの小型実験で分かるとおり、数値計算から推定された磁気圧力より大きな静鉄圧を与えるヘッドの場合、磁場を印加しても凝固シェルの不連続が残存している。これは、溶鋼が常に耐火物スリーブに接触しながら凝固が進行した結果であると推定される。それにもかかわらず、希塩酸によるマクロ腐食で鑄片表層下に深い溝が発生しなかったのは、ジュール熱によりシェル先端の温度が上昇し、溶鋼との溶着性が向上した結果によるものと推定される。

実機の水平連鑄機の場合、操業中の溶鋼ヘッドは約900mm程度であり3重点シミュレータで推定された磁気圧力とバランスする溶鋼ヘッド約90mmの約10倍の値である。また、コイル電流はコイル間電圧とインピーダンス測定の結果から実機で3重点シミュレータの2倍程度であると推定され、おおよその磁気圧力はコイル電流の2乗に比例すると仮定すると4倍程度になり溶鋼ヘッドの上昇分を補うものでは

ない。従って、実機の水平連鑄機の場合は磁気圧力の効果で表面性状が改善したというより、ジュール熱によりシェル先端への溶鋼の溶着性が向上した事によるものと推定される。ただし、鑄片の間歇引き抜きのサイクルの中で、引き抜きの瞬間には静圧が動圧でキャンセルしたと考えられる現象も知られており⁷⁾、その際には磁気圧力が有効に作用する可能性も考えられる。

6. 結言

小型溶鋼実験および実機の水平連鑄機により、3kHzの高周波磁場を印加する事で3重点を有する連鑄機の初期凝固制御を行うことを試み以下の事が確認できた。

(1)溶鋼静圧に比べて磁気圧力が大きい条件では、磁気圧力により耐火物スリーブから溶鋼を引き離す事で、そこからの凝固の開始を防止でき、鑄片の表面性状は著しく向上する事が判明した。

(2)溶鋼静圧に比べて磁気圧力が小さい条件でも、耐火物スリーブからの抜熱速度より大きなジュール熱を与える事で鑄片の表面性状は大幅に向上した。

(3)実機の水平連鑄機へ本法の適用の結果、コールドシャットマークが軽減され、試験圧延の結果でも表面性状が改善される事を見出した。この場合、高周波磁場の印加によって発生したジュール熱によりブレイキングと接して凝固を開始したシェル先端の温度が上昇し溶鋼の溶着性が向上したためと推定された。

文 献

- 1) I.Miyoshino, E.Takeuchi, H.Yano, J.Sakane, T.Saeki and H.Kajioka: ISIJ Int., **29** (1989), 1040.
- 2) 森 健太郎, 中田正之, 小松政美, 長棟章生: 材料とプロセス, **2** (1989), 318.
- 3) M.Nakada, K.Mori, T.Osako, M.Komatsu, Y.Kawai and T.Sato: Proceedings of the Sixth Int. Iron and Steel Cong., **4** (1990), 388.
- 4) 田中 努, 安元邦夫: 材料とプロセス, **5** (1992), 983.
- 5) 中田 等, 森下雅史, 綾田研三: 材料とプロセス, **6** (1993), 6.
- 6) 林田道弥, 大野剛正, 尾野 均, 堤 一彦: 鉄と鋼, **73** (1987), S686.
- 7) 桑野清吾, 山本裕則, 沖本伸一, 庄田順一, 奈良正敏, 熊谷 忍: NKK技報, **136** (1991), 9.
- 8) 大迫隆志, 西岡信一, 小松政美, 石井俊夫: 材料とプロセス, **6** (1993), 1143.
- 9) 大島修三: 第129・130回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1991), 21.
- 10) T.Sato, S.Sugiyama, A.Yada, M.Nakada, K.Mori and T.Osako: Liquid Metal Flows ASME, **115** (1991), 11.
- 11) A.Honda, A.Miyamoto, T.Yamada, M.Ito, T.Anzai and T.Hirose: Nippon Kokan Technical Report, **32** (1982), 121.
- 12) 大迫隆志, 中田正之, 佐藤俊雄, 小松政美: 日本学術振興会, 製鋼19委員会, 凝固現象協議会, 19委-11336, 凝固-534.