

討10 ブルーム連铸機内凝固末端部の電磁攪拌による中心偏析の改善

川崎製鉄 技術研究所○鈴木健一郎, 新庄 豊, 村田賢治, 中西恭二
川崎製鉄 水島製鉄所 児玉正範, 岩永侑輔, 小島信司, 宮崎容治

1. 緒言

連铸タビの中心偏析, ポロシティなどの欠陥防止を目的とする連铸機内残溶鋼, クレーターの電磁攪拌の研究が活発に進められている。電磁攪拌により生ずる固-液共存層内の溶鋼流動によって柱状晶の剪断と樹間の濃化溶鋼の洗浄が起り、それぞれ、クレーター深部への等軸晶としての堆積や、バンド状の負偏析(ホワイトバンド)を生ずることが、最近の研究により明らかにされている。しかしながら、凝固前面が鑄片軸芯付近に達し、加速凝固が起るクレーター深部に対してこれらの考え方を直接適用することの是非については定見がない。本報告ではこのような観点から展開した、1) 最終凝固域での電磁攪拌をシミュレートするホットモデル実験ならびに、2) ホットモデル実験の結果に基づき設計、製作した電磁攪拌ユニットを用いたブルーム連铸機による鑄造試験の結果について述べる。

2. 凝固末端部の電磁攪拌に関するホットモデル実験

ブルーム連铸においてはバルジングに起因する中心偏析は少なく、ブリッジング個所の上部でV偏析, 下方で濃厚偏析が観察される。すなわち、凝固収縮による下方への軸芯部残溶鋼のサクション流動に対応して中心偏析やポロシティが形成されると考えられる。そこで、Fig.1に示すような異形鑄塊を用いて、④部の凝固が、⑤, ⑥部の凝固に優先するよう凝固条件を調整し、径を小さくした⑤部における下方へのサクション流動を加速してここにブリッジングや中心偏析を生成させる一方、これらの軸芯部欠陥に対する水平旋回型電磁攪拌の影響を調べた。(実験I)

さらに、鑄型内へ注入する溶鋼を注入途中で冷却する手法で溶鋼の加熱度を、したがって凝固形態を柱状晶主体あるいは等軸晶や分枝柱状晶を主体とする組織のいずれかに調整し、短時間の水平旋回攪拌を行ないホワイトバンドの発生状況や凝固組織に対する電磁攪拌の影響を評価した。(実験II)

2.1. 実験方法; 異形鑄型の断面積比 $(D_0/D_1)^2$ はネック部の径, $D_1 = 40\text{mm}$ の場合 5.5, 60mm の場合 3.7 である。この条件で、④部の凝固収縮量の⑤部の体積に対する比は、体積収縮率を 3.7% とすれば、 $D_1 = 40\text{mm}$ で 12%, $D_1 = 60\text{mm}$ で 9% となる。電磁攪拌なしの場合、V偏析発生数は前出の体積比と⑤部の予熱条件に依存し、⑤部のV偏析の数は $D_1 = 40\text{mm}$ で 3ヶ, $D_1 = 60\text{mm}$ では 1~2ヶであった。(Fig.2)

実験Iでは、⑤部におけるV偏析発生状況をV偏析の数, V偏析の巾(W_v), 長さ, 偏析の程度や等軸晶の巾(W_{EQ})として測定し、これにおよぼす電磁攪拌強度(軸芯での磁束密度, B にて表示)と電磁攪拌開始時のバルク残溶鋼の径の影響を明らかにすることを主目的と

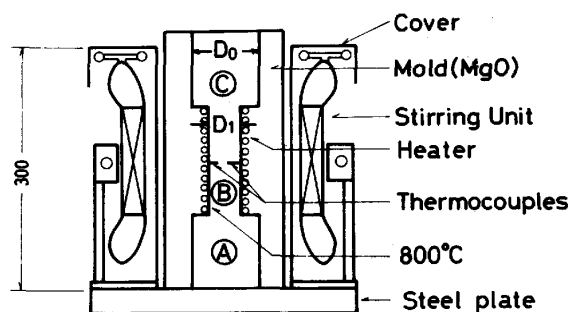


Fig.1 An experimental apparatus

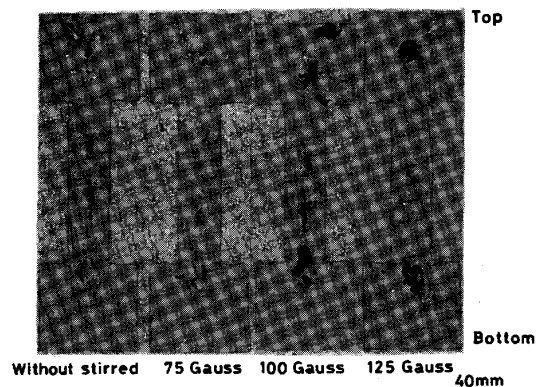


Fig.2 Effect of stirring force on V-shaped segregation ($D_1 = 40\text{mm}$)

した。さらに、実験Ⅰでは④部でのサクシオン流動を鑄塊軸芯の負偏析の程度から推定し、これに対する凝固組織と電磁攪拌の影響とホワイトバンド生成条件を求めた。

実験方法の概略を以下に示す。

- 1) 溶鋼組成; C 0.50, Si 0.25, Mn 0.90, P 0.05, S 0.02, Al 0.05%
- 2) 溶解炉; 50kg 高周波大気溶解炉, 上注ぎ鑄造
- 3) 溶鋼の過熱度; $150 \pm 10^\circ\text{C}$, 実験Ⅰでは湯道下部を水冷
- 4) 電磁攪拌; 水平旋回攪拌型, $B^{\text{MAX}} 200$ ガウス, 60Hz
- 5) 電磁攪拌条件; 注入完了後 1~4 min で攪拌開始, 一部間けつ攪拌(実験Ⅰ), 注入完了後 0.5~2 min 後, 0.5 min 間攪拌(実験Ⅱ)
- 6) 測温; ④部の $\frac{1}{2}$ 高さ, 軸芯および $R/2$ の2点
- 7) 電磁攪拌時固液界面流速の評価; 溶銑をネック部上端まで注入し、電磁攪拌時の溶銑の旋回速度を求め、固液界面流速の最大値と見なした。

2.2. 実験結果とその検討; 0.5% C 鋼の液相線, 固相線温度をそれぞれ 1483, 1350 $^\circ\text{C}$ とし、凝固曲線から、液相線, 固相線の凝固係数、それぞれ k_L, k_S を平方根則により算定し、 $D_1 = 60\text{mm}$ の場合につき以下の数値を得た。

実験Ⅰ; $k_L = 11.4, k_S = 8.0\text{mm}/\text{min}^{1/2}$

実験Ⅱ; $k_L = 18.0, k_S = 9.3$ (湯道冷却なし)

$k_L = 18.9, k_S = 9.9$ (湯道冷却)

これらの数値から液相線が軸芯に達するときの固液共存層の厚みを、実験Ⅰ, Ⅱでそれぞれ 9, 14mm と推定した。また、このとき温度勾配は 3~6 $^\circ\text{C}/\text{cm}$, デンドライト2次アーム間隔は 250~300 μ であり、ブルーム鑄片の凝固後半を再現し得たものと考えられる。

実験Ⅰ, Ⅱにおいてデンドライトの剪断に要する攪拌流速を見積り、それぞれ 4 cm/sec, 2 cm/sec を得た。

これらの流速はかなり低い、負偏析, 溶鋼流速, 凝固速度の関係¹⁾から求めた後者の数値が妥当と考える。

すなわち、2 cm/sec 程度の溶鋼流速によりデンドライトは剪断され (Fig.3)、分岐柱状晶, 等軸晶を形成し、その量は Fig.4 に示すように攪拌強度に依存することが明らかである。

軸芯部の偏析に対する攪拌強度の影響は Fig.2,4 に示すように攪拌強度増加にともない、中心偏析の程度, V 偏析の個数, 巾 (W_V), 長さとも減少する。さらに、電磁攪拌開始を注入完了後 1, 2, 3, 4 min と遅らせると、④部の等軸晶は次第に軸芯部に限定され、V 偏析

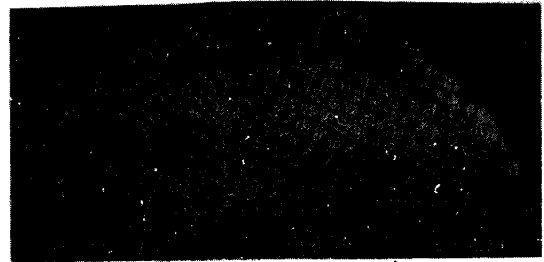


Fig.3 Cross sectional solidified structure of a small ingot

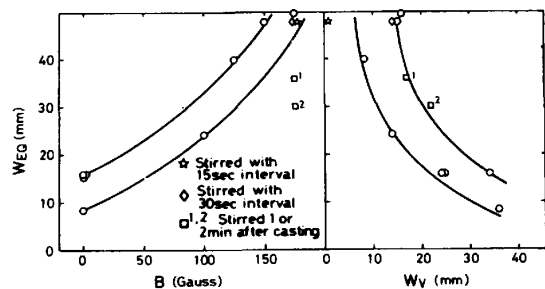
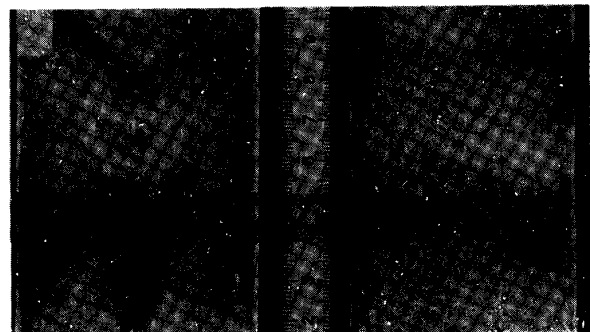


Fig.4 Relations among width of equiaxed crystals, V-streaks, and stirring intensity ($D_1 = 60\text{mm}$)



without EMS Intermittent stirring

Fig.5 Effect of EMS on centerline segregation

Table 1 Effect of EMS on diameter of equiaxed crystals

Stirring	mean free path (mm)	d_c (mm)	structure
without	1.17	0.45	Columnar
just after pouring	1.03	0.43	Branched
after 1min	1.01	0.46	"
after 2min	1.14	0.51	"
15sec interval	1.09	0.44	Eq. + Br.
30sec	1.28	0.48	"

d_c : reduced diameter of impurity segregated grains

が残存することがわかった。これは、電磁攪拌による中心偏析の改善に際し適切なバルク残溶鋼径、 D_B^* があることを意味する($D_1=60\text{mm}$, $B=175$ Gaussにおける D_B^* は $28\sim 37\text{mm}$)。また、中心偏析の防止には15あるいは30sec毎の間けつ攪拌が適していることが明らかである。(Fig.5)

さらに、③部水平断面の軸芯部 $10\text{mm}\phi$ について偏析粒の径と偏析粒間の Mean Free Path (等軸晶あるいは分岐柱状晶の円相等径に対応)を測定した。(Table 1) とくに偏析の少なかった15sec間けつ攪拌の場合には軸芯部が微細な等軸晶主体の凝固組織に調整されており、偏析粒の円相等径も小さいことが注目される。なお、偏析の大、小2例の試験片の軸芯部のマクロアナライザー^{2,3)}による分析を行なった結果、Pの濃度範囲毎の頻度曲線に大差はないこと、すなわち偏析の少ない試験片では電磁攪拌によりV偏析が分散されたに過ぎないことがわかった。

なお、実験Ⅱの結果はつぎのように要約される⁴⁾；①ホワイトバンドは柱状晶一分岐柱状晶の遷移点にのみ発生し、この時の攪拌流速は 2cm/sec 程度である。②低温鑄造一等軸晶凝固の場合には測温結果から推定した固相率、 $f_s=0.25\sim 0.40$ の条件で攪拌してもホワイトバンドは生成しない。③負偏析と固相線凝固係数から推定したサクシヨン流動は $D_1=60\text{mm}$ の場合、凝固シエル厚 15mm 以降で吸引負圧に対応して急激に増加し、高温鑄造時 5cm/sec 、低温鑄造時 7cm/sec に達し、電磁攪拌による攪拌流速を上廻る。④低温鑄造材でも液相線が軸芯に達した後まで電磁攪拌の開始を遅らせると、軸芯部に柱状晶が現れる。

これらの知見をまとめるとブルーム軸芯部のV偏析の分散には下方へのサクシヨン流動が支配的となる直前から電磁攪拌を行ない、等軸晶化を促進する一方、V偏析形成期間中これを継続することが重要と結論される。

なお、前出のバルク残溶鋼の径の最適値、 D_B^* はこのような観点から定まる値であることを簡単なモデルにより示す。

3. ブルーム連鑄機による電磁攪拌実験

3.1. 実験方法；実験は水島製鉄所・第1, 第3ブルーム連鑄機により行なった。電磁攪拌ユニットの設置位置は二次冷却帯および凝固末端部付近とし、二つ以上のユニットを組合せる実験も試みた。1連鑄では凝固末端部用として前述の知見と凝固前面の形状を相似させたHg浴の電磁攪拌実験の結果を基に設計した水平旋回攪拌ユニットを用いて実験を行なった。

3連鑄の攪拌ユニットはいずれもリニアモーター型で投入電力は $5\sim 50\text{Hz}$, 425kVA , 攪拌方向は垂直である。

実験は $0.15\sim 0.85\%$ Cにおよぶ広範な工程材(ブルームサイズ; $250\times 300\text{mm}$, $300\times 400\text{mm}$, 過熱度; $20\sim 45^\circ\text{C}$, 鑄造速度; $0.6\sim 1.1\text{m/min}$)を対象として進め、代表的な鑄片につき軸芯部の等軸晶率と中心偏析を調査する一方、画像解析装置やマクロアナライザーにより軸芯部の微細等軸晶や偏析粒の形態, 分布を解析した。

3.2. 実験結果とその検討；鑄造速度を上げて柱状晶凝固域で凝固末期攪拌を行ない、負偏析から攪拌流速を $0.5\sim 5\text{cm/sec}$ と推定した。攪拌域の凝固組織を二次冷却帯における強攪拌の場合と比較すると、凝固末端での攪拌は柱状晶→分岐柱状晶→等軸晶の組織変化が整然と起っており、凝固組織のコントロールにより適していると考えられる。

また、等軸晶帯での電磁攪拌ではホワイトバンドの発生がない点はホットモデル実験の結果と合致している。凝固末端電磁攪拌は、とくに高炭材の等軸晶の増加に効果があると考えられる。これはほぼ同一の鑄造条件

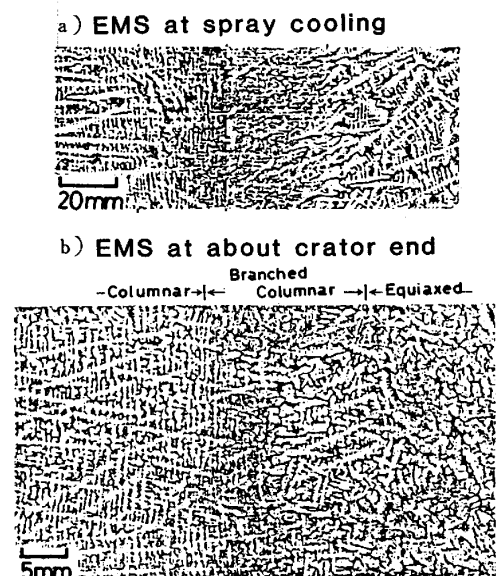


図6. Fig.6 Change in solidified structure by EMS

で二次冷却帯での電磁攪拌が等軸晶率におよぼす影響を調べた岡野らの実験結果¹⁾との対比 (Fig.7) から明らかであり、凝固末端電磁攪拌が等軸晶の安定化に効果があるとするホットモデル実験Ⅱの結果に対応するものと考ええる。ブルーム軸芯部の中心偏析を5mmφのドリルを用いて調べ、バルク溶鋼の組成で規格化した指数、 C/C_0 と凝固末端の電磁攪拌力との関係を Fig.8 に示す。 C/C_0 は攪拌力の増加にともない減少すること、また、凝固末端電磁攪拌を開始した時のバルク残溶鋼の厚さに関しては40~50mmに最適範囲があることは Fig.8 から明らかであり、いずれもホットモデル実験Ⅱ

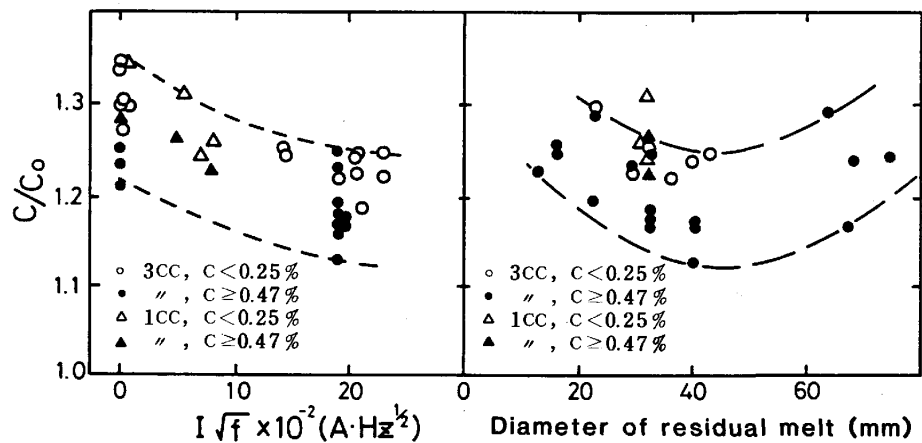


Fig.8 Relation among C/C_0 , stirring force, and diameter of residual melt

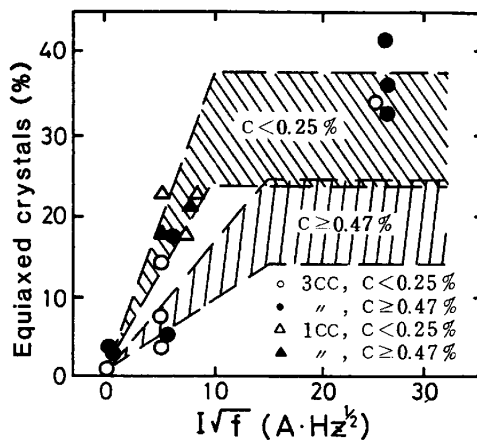


Fig.7 Effect of EMS at crator end on area fraction of equiaxed crystals on upper half of cast bloom

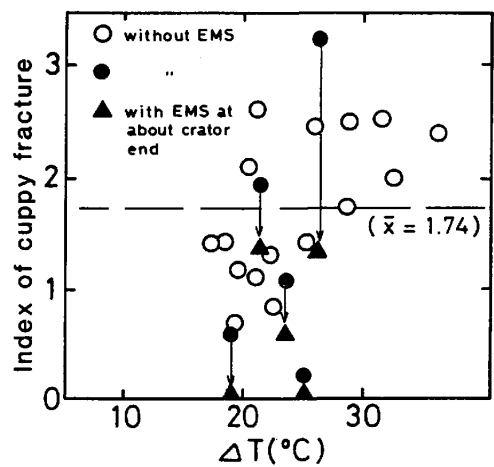


Fig.9 Effect of EMS on cuppy fracture of high carbon wire

の結論に符号している。なお、Fig.9 に示すように凝固末端電磁攪拌は高炭素鋼線材のカッピー破断率の減少に著効があり、破断率はほぼ半減する結果が得られた。

すなわち、二次冷却帯および凝固末端における電磁攪拌を併用し、ブルーム軸芯部の凝固組織を緻密な等軸晶に調整してサクシヨン流動に対応させた上、V偏析を分散することが可能と考えられる。

4. 結 言

連铸ブルームの中心偏析、センターポロシティの低減を目的に主として凝固末端の電磁攪拌条件の最適化につき検討した。このため、まず凝固収縮による固液混相域でのサクシヨン流動を加速しうよう設計された異形鋳塊により凝固実験を行ない、サクシヨン流動に対応して生成されるV偏析におよぼす水平旋回攪拌の影響を調べた。その結果、電磁攪拌時の残溶鋼の径や電磁攪拌力に最適条件があり、これらの条件は凝固の進行に対するサクシヨン流動の変化や攪拌による柱状晶の剪断と等軸晶化の条件を考慮して説明できることを示した。

これらの実験結果を基礎に、水島製鉄所のブルーム連铸機用凝固末端電磁攪拌設備を製作し、鋳造試験を展開した結果、ホワイトバンドの生成をとまわずに軸芯部凝固組織を等軸晶主体に調整し、中心偏析、センターポロシティとも著しく改善された鋳片を製造する電磁攪拌条件が見い出された。

5. 文 献

- 1) 岡野ら；金属学会シンポジウム，('82.2.5)，
- 2) 安部ら；鉄と鋼，69(1983)，S312，
- 3) 鈴木ら；鉄と鋼，68(1982)，S 875，
- 4) 鈴木ら；鉄鋼協会第106回講演大会にて報告予定，
- 5) 岡野ら；川鉄技報，12(1980)，428.