

# 電磁攪拌による水平連続鋳造ビレットの センターポロシティ低減

山中 章裕\*・太田 晃三\*・照沼 正明\*<sup>2</sup>・辻田 進\*<sup>2</sup>・阿部 俊治\*<sup>2</sup>

Reduction of Center Porosity of Round Billet by Electromagnetic Stirring in Horizontal Continuous Casting

Akihiro YAMANAKA, Kozo OTA, Masaaki TERUNUMA, Susumu TSUJITA and Toshiharu ABE

**Synopsis :** In order to reduce center porosity of round billet in horizontal continuous casting, experiments of electromagnetic stirring (EMS) were carried out for two kinds of stainless steel containing Nb and Ti, which had a tendency to enhance center porosity. Combined electromagnetic stirrings in mold (M-EMS), in strand (S-EMS) and in final solidification region (F-EMS) were applied to continuous casting of 263 mm $\phi$  round billet.

It has been found that the combined stirrings of M-EMS, S-EMS and F-EMS are most effective to reduce center porosity of the billet. A lack of the stirrings decreases the effect on the reduction of center porosity. S-EMS was proved to have the effect to disperse equiaxed crystals in the molten steel, which were formed in the mold by M-EMS and consequently, enable uniform packing of the equiaxed crystals in the center of billet. F-EMS was proved to be most effective, when it was applied for the liquid core diameter of 40 mm to 80 mm. F-EMS is thought to have the effect to secure the fluidity of mushy zone in the center of billet by the stirring of 15 Hz, but has no influence on solidification structure.

**Key words:** center porosity; electromagnetic stirring; horizontal continuous casting; stainless steel; equiaxed crystal.

## 1. 緒言

連鋳鋳片のセンターポロシティの低減において、未凝固圧下法は極めて効果的であると言えるが、丸ビレット鋳片の場合、真円性を損なうという問題が付随し、真円への再成形という新たな課題が発生する。そこで、本研究では、丸ビレットの水平連続鋳造に関して、凝固末期における電磁攪拌を含む組み合わせ電磁攪拌法の適用を検討した。水平連続鋳造におけるセンターポロシティ低減を目的とした電磁攪拌の適用例として、組み合わせ電磁攪拌の例が多数報告されている<sup>1-3)</sup>。これらの例は、いずれも炭素鋼あるいは、SUS304主体であり、特にセンターポロシティが増大し易いという鋼種を対象としたものではない。また、水平連続鋳における凝固末期電磁攪拌適用によるセンターポロシティ低減効果に関する詳細な報告は見られない。

本研究では、センターポロシティの増大し易い、Ti, Nbを含有するステンレス鋼を対象とし、凝固末期電磁攪拌を含む、3段の組み合わせ電磁攪拌の可能性について試験を行った。その結果に基づき、電磁攪拌による凝固組織への影響、凝固末期の電磁攪拌位置の変更によるセンターポロシティへの影響と3段電磁攪拌の必要性を明らかにするとともに、電磁攪拌条件によるセンターポロシティ低減効果

を明らかにした。

## 2. Ti, Nb含有ステンレス鋼のセンターポロシティの実態

Fig. 1に、センターポロシティ発生の代表例として、Ti含有のSUS321 (11Ni-17Cr-0.5Ti-Fe)とNb含有のSUS347 (12Ni-18Cr-0.8Nb-Fe)の鋳片の縦断面のマクロ組織(王水腐食)について示す。いずれも鋳片中心部より表皮部に向けてセンターポロシティが数十mmの範囲で存在している。この水平連鋳ビレットは熱間押出製管法によりパイプに加工されるが、このような大きなセンターポロシティが存在すると、製管時にパイプの内面きず発生の原因となる。通常、熱間押出製管法においてはビレット中心部を事前に穿孔するが、小さなセンターポロシティであれば、穿孔により除去されてしまい問題とならない。しかし、センターポロシティが大きく、中心部からの存在範囲が広い場合は、センターポロシティが問題とならなくなるまで穿孔径を大きくとる必要があり、製品歩留りが低下することになる。

一般に凝固温度区間で液相が凝固すると凝固収縮が起こり、その収縮分を補うために樹間の溶鋼が流動しようとするが、この樹間流動が不十分な場合、凝固収縮を補うこ

平成10年2月24日受付 平成10年6月4日受理 (Received on Feb. 24, 1998; Accepted on June 4, 1998)

\* 住友金属工業(株)総合技術研究所(Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashimagan Ibaraki-ken 314-0255)

\*<sup>2</sup> 住友金属工業(株)関西製造所(Kansai Steel Division, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

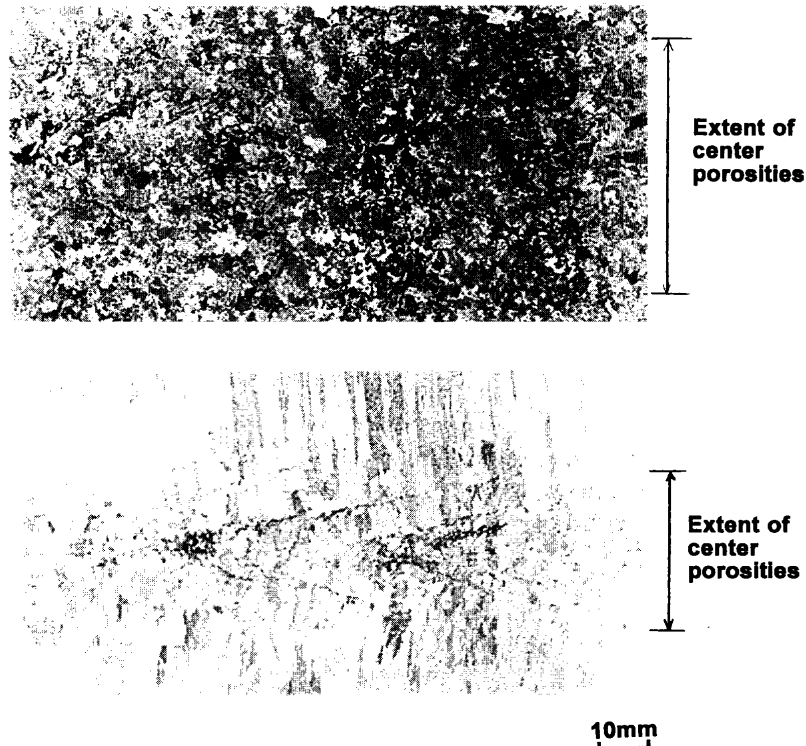


Fig. 1. Macrostructure in longitudinal section of 265 mm round billet in horizontal continuous casting (HCC).  
(a) SUS347: 12Ni-18Cr-0.8Nb-Fe, (b) SUS321: 11Ni-17Cr-0.5Ti-Fe

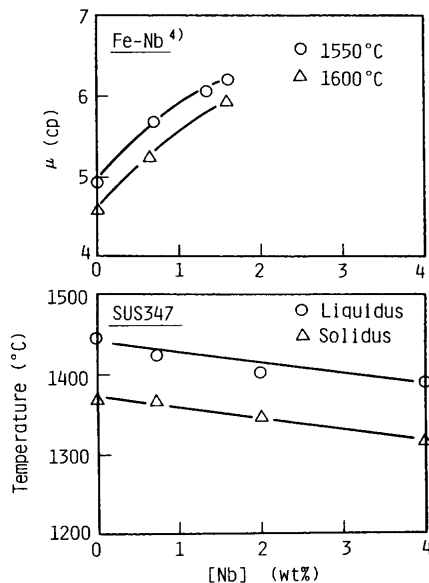


Fig. 2. Effect of Nb concentration on viscosity of molten steel, liquidus and solidus temperatures of SUS347 steel.

とができなくなりポロシティが発生し易くなる。水平連铸では溶鋼静圧が他の連铸法に較べ小さく、流動駆動力が低下し、ポロシティが発生し易くなると考えられる。一方、凝固温度区間の固体の流動性は固相率が大きくなるにつれて大幅に低下していき、これがポロシティの発生を左右する大きな要因と考えられる。

Fig. 2に、Nb濃化による溶鋼粘度（ただし、Fe-Nb系<sup>4)</sup>の変化と、熱分析より求めたNb濃度変化による液相線温度と固相線温度の変化を示す。ポロシティ近傍のNbの濃

度をEDXにより測定したところ、最大で4%のマイクロ偏析によると考えられる濃化が確認されており、図から融点で40°C程度の低下が考えられ、粘度も大きく増加することが予想される。さらに、Nbのマイクロ偏析により固相線温度が低下し凝固温度区間の増加が生じると考えられる。従って、すくなくともこれらのデータから見ても、Nbの増加は、ポロシティを発生し易くしていると考えられる。またTiについても、濃化により溶鋼粘度を増す<sup>4)</sup>ことから同様のことが言える。センターポロシティの発生要因については、融点、粘度以外に凝固収縮量、透過率等についても考慮すべきであるが、ステンレス鋼でのこれらのデータは乏しい。

### 3. 実験方法

#### 3.1 水平連続铸造における電磁攪拌設備の概要

水平連铸機<sup>5)</sup>の概要を電磁攪拌装置とともにFig. 3に示す。铸型内電磁攪拌（以下、M-EMSと呼ぶ）、ストランド電磁攪拌（以下、S-EMS）、凝固末期電磁攪拌（以下、F-EMS）を有しており、これらの組み合わせ適用も可能である。M-EMS、S-EMSとも永久磁石の機械回転式の電磁攪拌装置であり、その設置位置は固定されている。F-EMSは、回転磁界方式でその中心位置が銅铸型の入り側端面からの距離で9.5mの範囲まで可変式となっており、F-EMSの铸片に対する印加タイミングの変更を可能としている。また、回転周波数も、最大で15Hzまで設定する

ことを可能とした。

### 3.2 実験条件

Table 1に铸造実験条件を示す。対象鋼種はNb成分を0.8%含有するSUS347とした。SUS347は $\gamma$ 单相で凝固する。モールドサイズは内径265mmと一定とし、铸造速度、タンディッシュ内の溶鋼加熱度も、極力一定とした。電磁攪拌条件としては、各電磁攪拌の効果を調べるために、①M-EMS単独、②M-EMSとS-EMSの併用、③M-EMS、S-EMSとF-EMSの併用と3通りの組み合わせで試験を実施した。また、M-EMSは4.2Hzで一定に、S-EMSは、4.2Hzまたは1.7Hzの設定となったが、この回転数の違いは、マクロ組織等、試験結果にほとんど影響無い程度である。F-EMSは最大の15Hzで一定とした。また、③の組み合わせにおいて、F-EMSの印加位置を種々変更して、その影響を調べた。

各実験条件の鑄片断面のサンプルを採取し王水腐食によりマクロ組織を検出した。

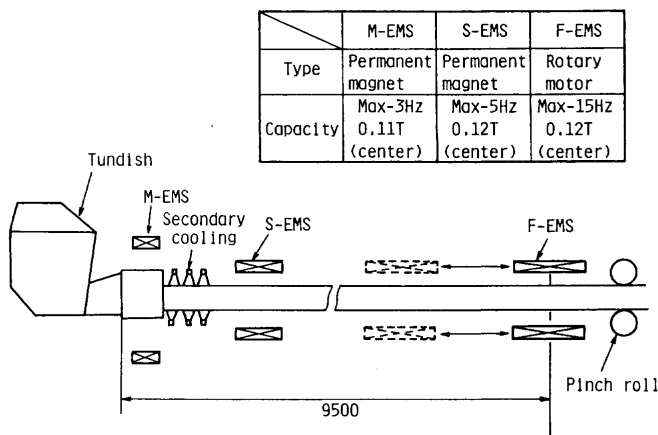


Fig. 3. Schematic diagram of horizontal continuous casting (HCC) machine.

Table 1. Experimental conditions.

Steel grade	SUS347
Mold size	265 mm $\phi$
Casting speed	0.35~0.48 m/min
Superheat in tundish	28 ~ 33 °C
Stirring	① M-EMS ② M-EMS + S-EMS ③ M-EMS + S-EMS + F-EMS

Table 2. Heat transfer coefficient used for calculation

Distance from meniscus: X (m)	Mold X<0.15	Mold 0.15<X<0.35	Mist cooling 0.35<X<1.3	Radiation 1.3<X
h (W/m <sup>2</sup> K)	1400	1160	h <sub>w</sub>	h <sub>r</sub> ( $\epsilon=0.8$ )

$$h_w = 5.7 T_s^{0.12} \cdot W^{0.52} \cdot V_a^{0.37}, \quad V_a: 15 \text{m/sec}, \quad W: \text{Water density} (\text{g/m}^3)$$

### 4. F-EMS印加時の未凝固径の推定

F-EMSの印加位置の変更、铸造速度の変更等により、F-EMS印加時の鑄片の凝固状態が種々変化する。そこで、F-EMSの印加時の影響を明確にするために、伝熱計算により鑄片の未凝固領域の直径（以下、未凝固径と呼ぶ）を推定した。

(1)式に示す一次元円筒座標系の伝熱方程式を(2)、(3)式の境界条件のもとで解いた。計算は、有限差分法により実施した。間欠引抜の1サイクルは0.5秒前後と小さく、伝熱的には設定铸造速度下での連続引抜として近似した。また電磁攪拌による溶鋼攪拌時の伝熱は、全引抜工程中、短時間であるために、凝固シェル成長への影響は少ないとして考慮しなかった。

$$\rho C_p (\partial T / \partial \theta) = (1/r) \cdot \{ \partial [\lambda r (\partial T / \partial r)] / \partial r \} \dots \dots \dots (1)$$

$$\partial T / \partial r = 0 \quad \text{at } r=0 \dots \dots \dots (2)$$

$$-\lambda (\partial T / \partial r) = h (T_s - T_0) \quad \text{at } r=R \dots \dots \dots (3)$$

$\rho$ : 密度,  $C_p$ : 比熱,  $\lambda$ : 熱伝導度,  $T_s$ : 鑄片表面温度,  $T_0$ : 水温または外気温度,  $h$ : 鑄片表面熱伝達係数

比熱、熱伝導度等の計算に必要な物性値は、SUS347のものが無く、SUS304の物性値<sup>6)</sup>で代用し、融点のみFig. 2に示した実測値を用いた。また、計算に用いた鑄片表面の熱伝達係数をTable 2に示す。計算の妥当性を確認するため、溶鋼排出テストによる凝固シェル厚の測定値と計算値との比較、S-EMSでのホワイトバンド発生位置における凝固シェル厚の実測値と計算値の比較を実施した。その結果、铸造速度条件によらず、ホワイトバンド発生位置と溶鋼排出テストの凝固シェル厚は、固相率0.3に相当するシェル厚の計算結果とほぼ合致した。

### 5. 実験結果と考察

#### 5.1 M-EMSのみ印加した場合

Fig. 4に鑄片のマクロ組織とその模式図を示す。M-EMSのみ印加した場合、鑄片の中央より上面側は柱状晶であり、下面側に等軸晶が見られる。この等軸晶は、鑄型内電磁攪拌によって生成された結晶の核が凝固末期に下面側に沈降したものと考えられる。等軸晶の粒径は1~2mmである。

ポロシティの存在範囲は、53mmと大きく広がっている

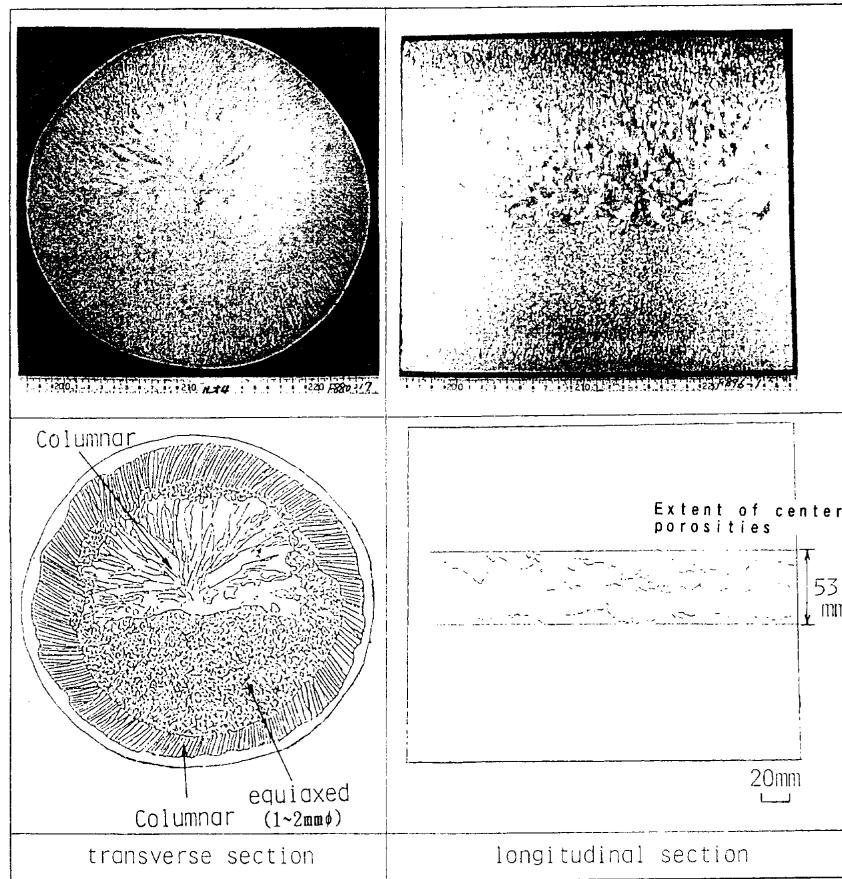


Fig. 4. Macrostructure of HCC billet (with M-EMS,  $V_c=0.34$  m/min).

が、中央より上面側の方により多く分布している。すなわち、ポロシティは中央より上面側の粗大な柱状晶または分岐柱状晶の粒界に多く認められ、下面側の等軸晶間に認められるポロシティより、より広範囲に分布する傾向がある。従って、センターポロシティの存在範囲の広がりを抑制するためには、このような柱状組織ではなく、少なくとも鑄片の中央部を微細な等軸晶で充填すべきであると考えられる。

## 5.2 M-EMSとS-EMSの併用の場合

Fig. 5にM-EMSとS-EMSの同時印加の場合の鑄片のマクロ組織とその模式図を示す。M-EMS単独の場合とは違って、鑄片中央部には、鑄片と同心円をなす等軸晶域が存在しており、その径はS-EMSにより発生した負偏析帯(いわゆる炭素鋼のホワイトバンド<sup>7)</sup>に相当)の径に等しい。

すなわち、S-EMSの印加位置よりも後方で、鑄片内部に等軸晶が充填されており、その粒径は、約1mmとM-EMS単独の場合より、やや小さくなっている。センターポロシティの存在範囲も43mmと、M-EMS単独の場合よりも、小さくなっており、鑄片縦断面でみると、V字状を呈している。V字状の位置のセンターポロシティは、充填された等軸晶間の隙間に存在し、V偏析の発生機構と同様であると考えられる。従って、S-EMSの役割としては、

等軸晶の増殖とその等軸晶が凝固末期に沈降してしまわない様に攪拌によって液相中に分散させる事であると考えられる。

## 5.3 M-EMS, S-EMS, F-EMSの併用の場合

### 5.3.1 F-EMSの凝固組織への影響

Fig. 6にM-EMS, S-EMS, F-EMSの同時印加の場合のマクロ組織の一例とその模式図を示す。凝固組織はM-EMSとS-EMSの併用の場合とほとんど変わらず、鑄片の中心部に鑄片と同心円状の等軸晶域が存在する。Fig. 7に鑄片の上面～下面の間の結晶粒径分布を示す。これらは、鑄造速度が0.38 m/minと0.37 m/minの場合の、それぞれ1チャージ分と2チャージ分の試験結果である。結晶粒径は、鑄片の上面側から下面側にかけて2mmピッチで、等軸晶の場合は最大粒径とし、柱状晶の場合は測定位置での結晶粒の幅として求めた。S-EMS印加以降の結晶粒の大きさは、0.3~1.2mmとほぼ一定で、かつ先のM-EMSとS-EMSの併用場合と差がない。従って、F-EMSによって凝固組織の変化は、ほとんど起こっていないと言える。

センターポロシティは、やはりV字状を呈しているが、M-EMSとS-EMSの併用場合より、その存在範囲は32mmと小さくなっており、かつV字の広がりの角度が大きくなっている。このように凝固末期の電磁攪拌でV字の広がりの角度が大きくなる現象は、綾田ら<sup>8)</sup>によっても報告され

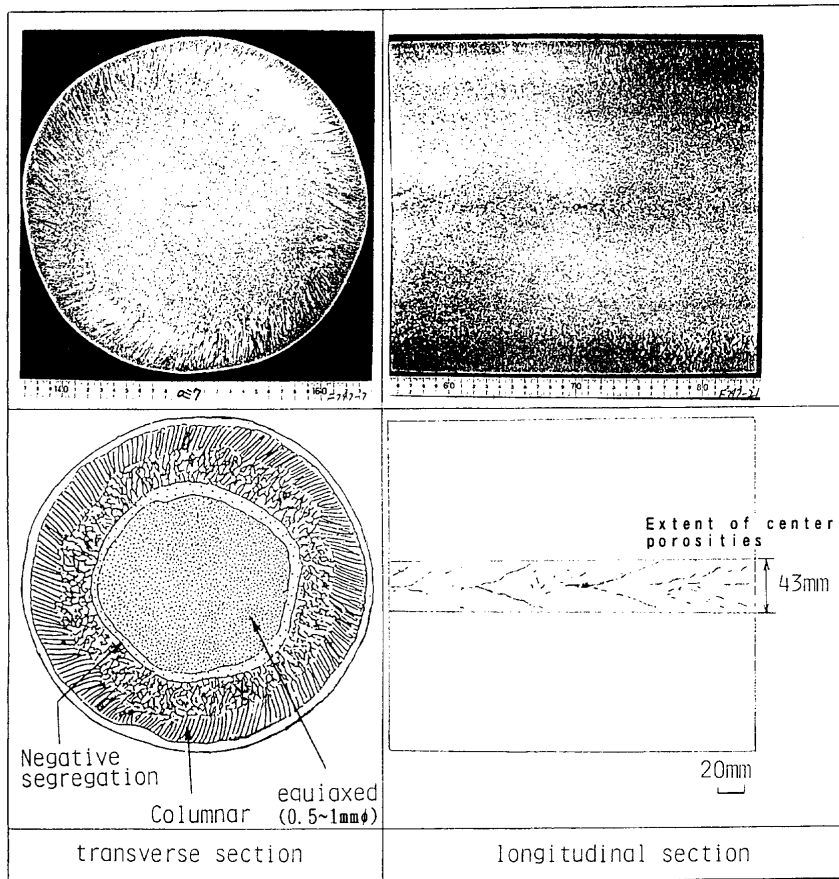


Fig. 5. Macrostructure of HCC billet (with M-EMS and S-EMS,  $V_c=0.48$  m/min).

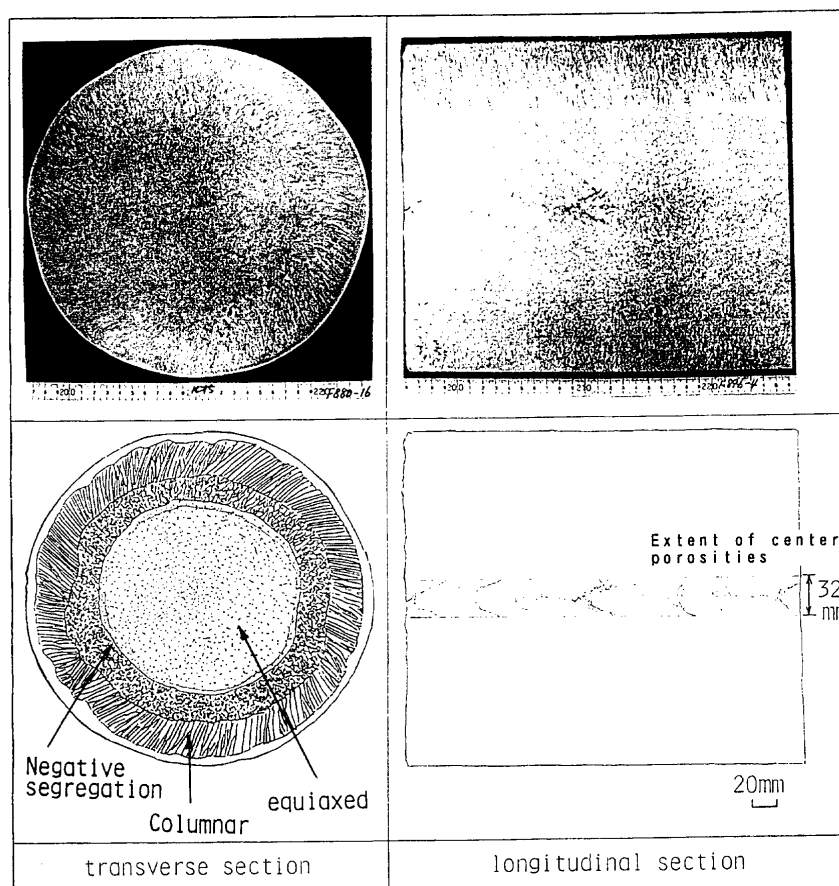


Fig. 6. Macrostructure of HCC billet (with M-EMS, S-EMS and F-EMS,  $V_c=0.37$  m/min).

ており、凝固末期の電磁攪拌によって等軸晶が鋳片中心部に集められ、凝固シェル形状が平坦になるからであるとしている。またその結果、結晶の充填構造が均一となることでV字状のポロシティが生じにくいとしている。いずれにしても、センターポロシティの広がりが小さくなることは、凝固末期まで、液相、固相の流動性が確保されたため、固液共存相の幅が小さく、流動性を保ち易い外側から収縮孔が液相で充填されて行くものと考えられる。

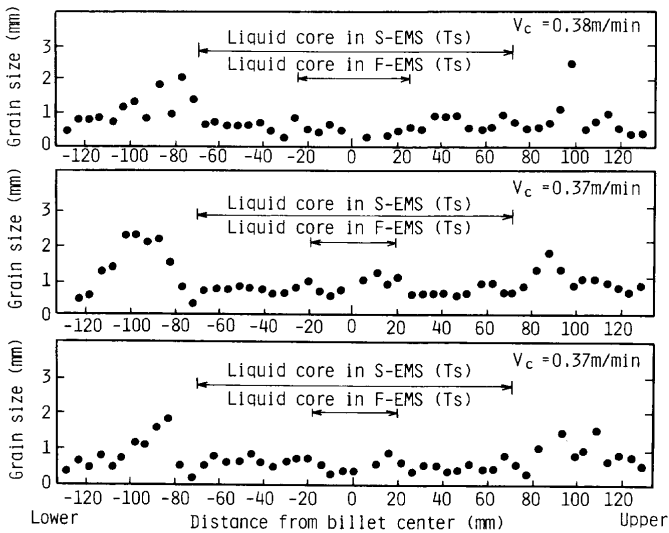


Fig. 7. Distribution of grain size in the billet after stirring (with M-EMS, S-EMS and F-EMS).

5.3.3.2 F-EMSの印加時期の凝固組織への影響

Fig. 8にF-EMSの印加時期の鋳片未凝固径を大小変化させた時の鋳片中心部横断面のNb元素を対象としたマッピング分析結果（ビーム径50 $\mu$ mのEPMAによる）を示す。なお、F-EMS印加時の未凝固径（ピレット横断面における固相線温度以上の領域の直径）は、F-EMSの印加開始と終了の位置において計算により求めた。Fig. 8(a)において、この未凝固径が114~87mmと大きな場合は、センターポロシティの存在範囲は46mmと大きく、かつF-EMSの印加により負偏析層が発生している。一方、Fig. 8(b)において、未凝固径が58mm以下の場合、センターポロシティの存在範囲は32mmと抑制されている。前者においては、鋳片中心部にまだ液相が十分に存在している状態（中心 $f_s=0.05$ ）から電磁攪拌を開始したため液相の流速が大きくなり、洗浄効果により負偏析層<sup>9)</sup>を形成したと考えられる。また電磁攪拌終了時の未凝固径も87mmと大きく、電磁攪拌終了後にセンターポロシティが生じたものと考えられる。一方、後者においては電磁攪拌開始時の鋳片中心固相率は0.3と大きく、F-EMSによっても大きな溶銅流動は起こり得ず、前者のような負偏析層が形成されなかったと考えられる。しかし、鋳片中心部の凝固が進んだ状態では、液相の流動性が急激に低下していく中で、センターポロシティが形成されつつあり、この時期に外部より流動の駆動力を与えてやることは、形成されつつある空隙を充填

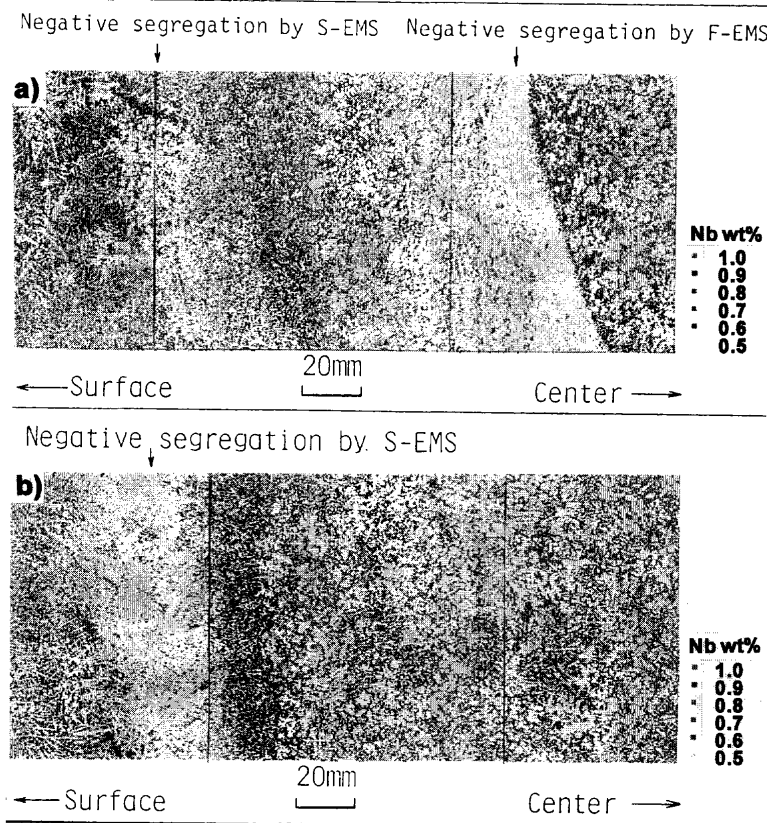


Fig. 8. Effect of F-EMS on the macrostructure of HCC billet.  
 (a) Diameter of liquid core (Ts) in F-EMS: 114~87 mm, Extent of center porosity: 46 mm  
 (b) Diameter of liquid core (Ts) in F-EMS: 58~0 mm, Extent of center porosity: 32 mm.

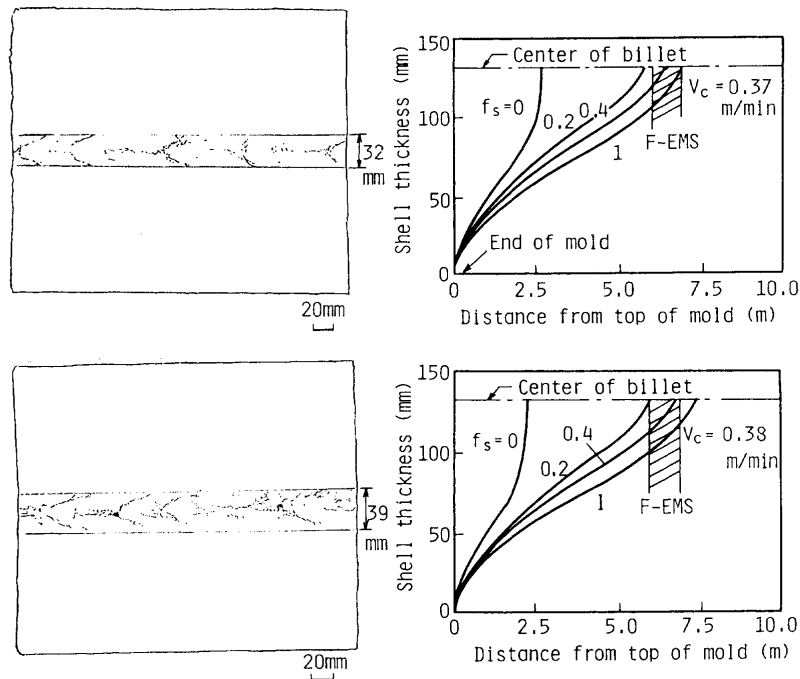


Fig. 9. Relation between the position of F-EMS and the extent of center porosity.

するのに大変効果的であると考えられる。

次に、Fig. 9にF-EMSの印加位置とセンターポロシティの発生状況を示した。いずれの場合も、センターポロシティの存在範囲は狭く、この図からは、固相線温度基準の未凝固径で50~40mmであり、鋳片中心部の固相率が、0.2程度から電磁攪拌を印加するのが良いと考えられる。さらに鋳片中心部の等固相率線の間隔も、固相率0.2から高固相率となる程、密となっており、電磁攪拌装置の長さを考えた場合、逆にこのような位置に電磁攪拌を配置するのが有効である。すなわち、電磁攪拌の位置を等固相率線の間隔が密になる高固相率側に配置するのが好ましいと考えられる。この様に凝固末期において溶鋼が流動するのは、せいぜい $f_s=0.5$ が限界<sup>9)</sup>とされているが、それよりもさらに高固相率側で電磁攪拌により流動が起こりうるとすれば、電磁攪拌による発熱で実質的に固相率が低下する場合、あるいは、電磁攪拌のせん断力による見掛け粘度の低下等が考えられるが、ここでは明確にこれらが確認できるような兆候は見られなかった。

## 6. 最適F-EMS印加条件

以上のような知見を基本としてSUS347のみならずSUS321の265mm径の鋳造についても同様に、3段の組合せの電磁攪拌を実施し、かつF-EMSの位置を種々変更して、センターポロシティの低減効果の確認を行った。その結果をFig.10に示す。SUS347, SUS321とも、固相線温度を基準とした未凝固径で40~80mmとなるように電磁攪拌中心を設定するのが効果的であると言える。

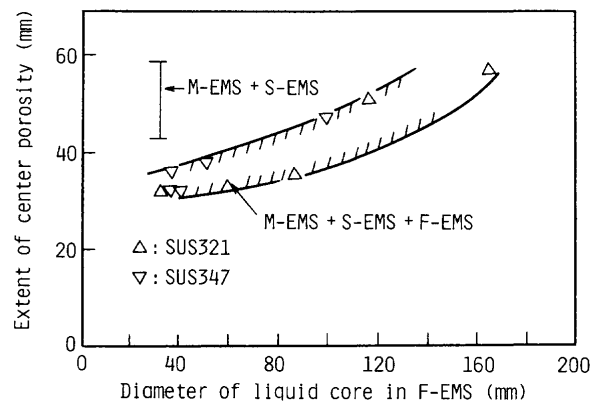


Fig. 10. Effect of F-EMS on extent of center porosity.

## 7. 結論

本研究では、凝固末期電磁攪拌を含む組み合わせ電磁攪拌の可能性について検討を行った。すなわち、水平連続鋳造機において、センターポロシティの増大し易い、Nbを含有するSUS347鋼を主対象とし、265mm径のビレット鋳造を中心に鋳造条件をほぼ一定にして、M-EMS, S-EMS, F-EMSの電磁攪拌の組合せとF-EMSの印加時期を変更して試験を実施した結果、センターポロシティの抑制と凝固組織への影響について以下の結論が得られた。

(1) センターポロシティの抑制については、M-EMS, S-EMS, F-EMSの3段の組合せ電磁攪拌が最も効果的で、水平連続鋳造においては、どれを欠いてもセンターポロシティ抑制効果が低減することが判明した。

(2) S-EMSはM-EMSで生成した等軸品のさらなる増殖と、水平連続鋳造において凝固末期まで等軸品を沈降させずに液相中に分散させる効果があることが明らかになった。

た。これは水平連続鑄造において、電磁攪拌によりセンターポロシティを低減しようとする場合の特有の問題と考えられるが、鑄型内電磁攪拌と凝固末期の間に、少なくとももう一つの電磁攪拌(S-EMS)が必要であることを指摘した。

(3) 3段の電磁攪拌において、F-EMSの印加時期を固相線温度基準の未凝固径で40~80mmの位置となるようにするのが最も効果的であることが判明した。また、Ti含有のSUS321鋼に対しても同等の効果が得られることが判明した。

(4) F-EMSは、結晶粒径等、凝固組織にはほとんど影響を与えないが、未凝固径40~80mmの凝固末期においても、15Hzの攪拌付与により高固相率の凝固末期まで固液共存相内の流動性を確保をさせることができると考えられる。

## 文 献

- 1) 森健太郎, 中田正之, 小松政美, 沖本伸一, 山本裕則: 材料とプロセス, **5** (1992), 327.
- 2) 中島啓之, 小菅俊洋, 河本克彦, 松村省吾, 土田英典, 岩崎央: 材料とプロセス, **4** (1991), 215.
- 3) 宮崎 純, 中田 等, 安中弘行, 綾田研三, 大手 章, 森隆資, 成田貴一: 鉄と鋼, **68** (1982), S278.
- 4) 溶鋼・溶滓の物性値便覧, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1972), 44.
- 5) 中井 健, 杉谷泰夫, 平城 正, 阪根武良, 福島佳春, 清遠日出男: 住友金属, **37** (1985), 303.
- 6) 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1971), 80.
- 7) 高橋忠義, 萩原 巖: 日本金属学会誌, **29** (1965), 1152.
- 8) 綾田研三, 藤本孝彦: 日本学術振興会製鋼第19委員会(No. 10768), (1986).
- 9) 高橋忠義, 工藤昌行, 永井慎一: 鉄と鋼, **68** (1982), 623.