

討 8

電磁誘導攪拌法によるブルーム連鑄の偏析防止

新日鐵室蘭技研 前出弘文 室蘭 鈴木功夫 氏家義太郎
釜石 工藤紘一 八幡 古賀成典

1. 緒 言

自動車用棒鋼に代表される高級棒線材の連鑄化を進めるにあたり、鑄片の品質向上のために、i) 介在物：各種取鍋精錬による溶鋼の清浄化 ii) 表面疵：自動注入による湯面変動の防止および気水冷却による均一緩冷却 iii) 中心偏析：電磁攪拌による凝固組織等軸晶化などを中心とした各種の技術開発を進めてきた。とりわけ、中心偏析は、線材、棒鋼の伸線や冷間押し出しなどの加工工程で、カッペー断線やシェブロンクラックの原因となるため、その対策が重要な課題である。

本報告では、電磁攪拌法による凝固組織等軸晶化と中心偏析の防止について述べる。

2. 中心偏析防止の考え方

中心偏析防止は、ブルーム連鑄に限らずスラブ連鑄においても重要な課題であり、従来から多くの研究がなされている。偏析の機構や防止対策についても種々の知見が得られている。¹⁾

Fig. 1 にこれらの知見をもとに、ブルーム連鑄の偏析防止の基本的考え方を示した。スラブ連鑄において有効な手段となっている偏析成分の減少策やバルジングの防止策は、ブルーム連鑄ではとりにくい。たとえば被削性の点からP Sなどが必要成分のために対策とならず、また後者はブルーム連鑄ではバルジング現象が軽微なために主原因とはならないなどの違いがある

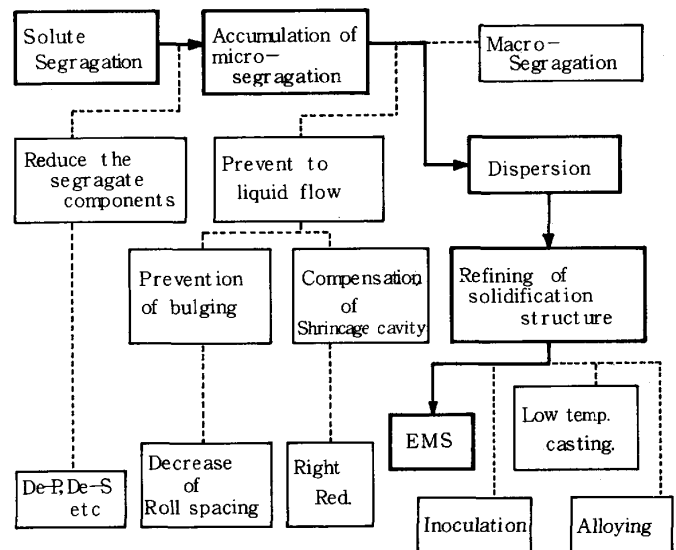


Fig. 1 Prevention of macro-segregation

したがって、Fig. 2 に示すごとく、凝固組織の等軸晶化による中心偏析の分散が最も有力な方法である。等軸晶化は、ステンレス鋼や珪素鋼板のリジング防止対策でもあり、多くの方法が試みられてきている。²⁾ 低温鑄造はとくに効果の顕著な方法であるがノズル詰りや介在物捕捉などの問題が大きく実用的には難かしい。

3. 等軸晶化

3-1 電磁攪拌による等軸晶化の考え方

電磁攪拌によるの等軸晶化は、i) 核生成：溶鋼の流動による柱状晶先端部の溶断あるいは分断による核の生成、ii) 核の成長、増殖あるいは消失：核の再溶解に対する安定性、の二つの段階を得て等軸晶凝固が達成されるものと考えられ、両者の達成程度により等軸晶化の範囲および等軸晶化の形態が決まる。Fig. 3 には、電磁攪拌法において、自由表面でのメニスカスの存在しない、凝固先端で核生成が起こることを示した。すなわち、隔板により上下に分離した鑄塊の下部においても組織が電磁攪拌により等軸

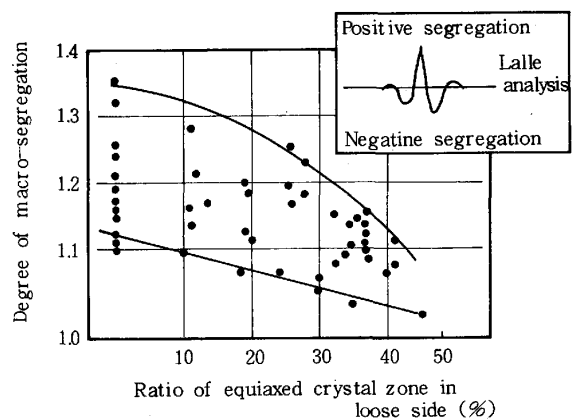


Fig. 2 Relation between ratio of equiaxed crystal zone and degree of macro-segregation

晶化されている。

Fig. 4には、未凝固溶鋼の温度条件により、核の安定性が左右され溶鋼の過熱度が消失して始めて、微細化が達成されることを示した。

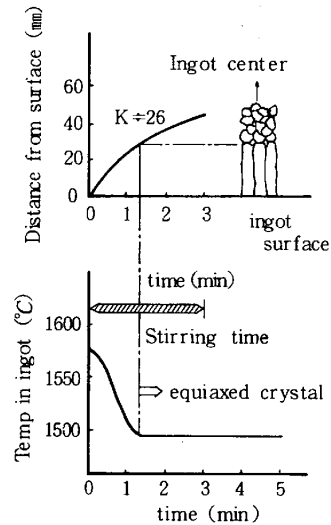
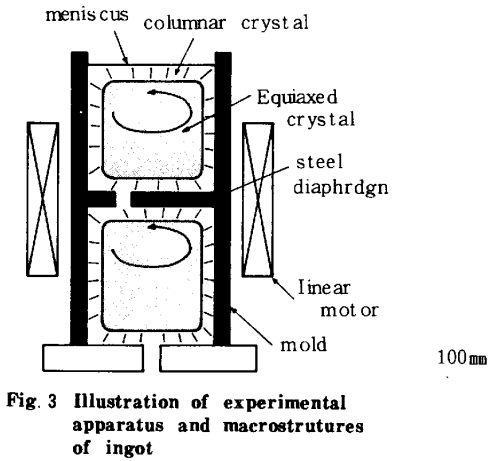


Fig. 4 Relations between distance from surface and temperature in ingot.

3-2 等軸晶化に及ぼす電磁攪拌条件の影響

電磁攪拌による等軸晶化を効果的に達成するためには、前述の考え方に従って操業上の各種の要因の影響を定量的に把握し、適確な条件選択が重要である。

Table 1に示す各々条件の異なるブルーム連铸機で、電磁攪拌の条件を変更させて実験を行ない、凝固組織微細化の実験式を導入した。実験式には以下の要因を検討した。

Table. 1 Bloom CCM in Nippon steel Corporation

	Bloom size (mm)	Costing speed (m/min)
M-No.2 C C	165 × 165 ~ 247 × 300	2.0 ~ 0.8
M-No.3 C C	350 × 560	0.8 ~ 1.0
Y-B L · C C	180 × 180 ~ 340 × 340	1.7 ~ 0.6
K-B L · C C	248 × 386	0.6 ~ 0.7 5

①成分：炭素鋼を対象としたが、C含有量によって等軸晶化の程度が左右され、中炭素鋼は比較的容易に等軸晶化するが、低炭素鋼、高炭素鋼は難しい。そのため、0.2% C、0.4% C、0.5% Cに分けて検討した。

②攪拌力：等軸晶化を支配するのは溶鋼の流動速度 (U) と考えられるが、これを示す攪拌力 (P) の指標として凝固前面推力 (H) を用いた。三者の間には次式の関係がある。

$$U = a_1 \cdot P^{1/2} = a_2 \cdot H^{1/2} = a_3 \cdot f_{re}^{1/2} \cdot i \cdot r$$

ここで、 f_{re} は周波数、 i は電流、 r は溶鋼プール半径 a_1, a_2, a_3 は比例関係を示す定数。

実験結果は、等軸晶率がPの冪乗に比例する形でまとめられたが、攪拌力を上げてゆくと等軸晶率の増加は飽和する。

③铸造速度：铸片サイズによらず等軸晶率は铸造速度 (V) の1/2乗に反比例する (Fig.5)。攪拌領域の铸片通過時間に関係づけることが出来る。

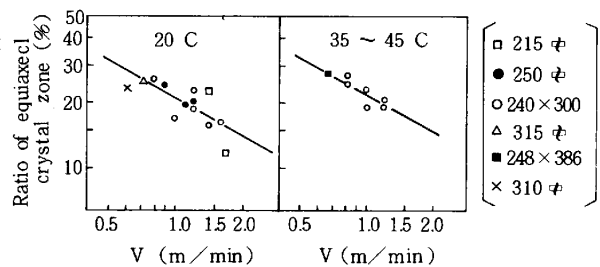


Fig. 5 Relation between casting speed and ratio of equiaxed crystal zone

④ 攪拌位置：攪拌部凝固率と等軸晶率が関係し、最適凝固率 (μ) が存在する。未凝固溶鋼の温度条件にかかわる核の安定性および溶鋼の流動性等の影響と考えられる。

以上の検討結果から、電磁攪拌による等軸晶化を総合的に評価するために、上記各要因と全等軸晶率 (E_T) との関係式として次式を得た。

$$E_T = A P^B \cdot V^{1/2} \cdot F(\mu) \quad (2)$$

ここで、 $F(\mu) = (\mu - a')(\mu - b')^2$ 、 A 、 B 、 a' 、 b' は各々 C-含有量によって定まる定数である。

Fig. 6 に (2) 式による等軸晶率の計算値と実験鑄片の等軸晶率測定値の対比を示した。

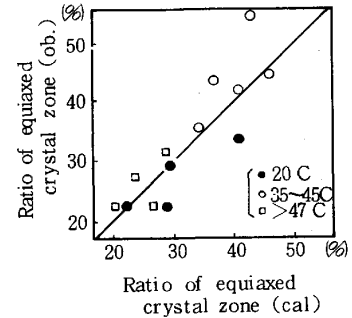


Fig. 6 Comparison of calculated and observed ratio of equiaxed crystal zone in loose side.

4. 負偏析形式におよぼす溶鋼流動の影響

高級棒線材のブルーム連鑄に電磁攪拌を適用するには、これらの製品が、切削加工あるいは熱処理を受けることが多く、溶鋼の流動に伴う負偏析の形成を十分に管理することが必要である。したがって、凝固組織の等軸晶化と同様に、負偏析形成に影響する作業上の種々の要因の影響度を定量的に把握し、適確な条件の選択が必要である。

電磁攪拌による負偏析の形成は、凝固界面の濃化溶鋼が、攪拌流により洗滌される結果と考える。Fig. 7 に模式的に示すごとく、攪拌流の強度により凝固界面の固液共存相内の洗滌作用を受ける範囲が左右される。一方、凝固の進行は、洗滌を受ける界面の更新および洗滌作用を受ける時間を左右し、負偏析の程度に影響する。したがって凝固界面の進行速度 (f) を考慮する必要がある。溶鋼の流動速度と凝固界面の進行速度および洗滌作用を受ける範囲 (Sh) の間には、次式の関係があることを高橋ら³⁾ が実験的に求めている。

$$U/f = 7500 \cdot Sh / (1 - Sh) \quad (3)$$

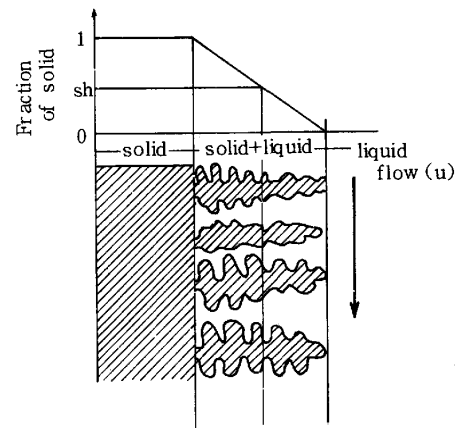


Fig. 7 Schematic illustration of washing effect with liquid flow

前記等軸晶化同様に、種々の連鑄条件および電磁攪拌条件のもとで実験を行ない (1) 式および (3) 式との対応により実験式を求めた。

なお、洗滌範囲は次式により、鑄片負偏析部分の分析値と対応づけた。

$$\bar{C}_p = (1 - S_n) C_{LD} + ShKoC_{LD} \quad (4)$$

ここで、 \bar{C}_p は洗滌を受けたあとの平均溶質濃度、 C_{LD} は母溶湯の溶質濃度、 Ko は平衡分配係数である。平衡分配係数は、0.2% C に対しては 0.20、0.4% C および 0.5% C に対しては 0.34 の値を用いた。

実験データを (1) 式および (3) 式で整理した結果は、凝固の進行速度の小さい飽域でバラツキが大きく、Fig. 8 に示すごとく、凝固シエルの厚さ (D) による補正項が必要となり、次式の実験式が得られた。

$$\frac{Sh}{(1 - Sh)} = A' \cdot \frac{\sqrt{P}}{f} \cdot e^{-B'D} \quad (5)$$

ここで、 A' 、 B' は C-含有量によって定まる定

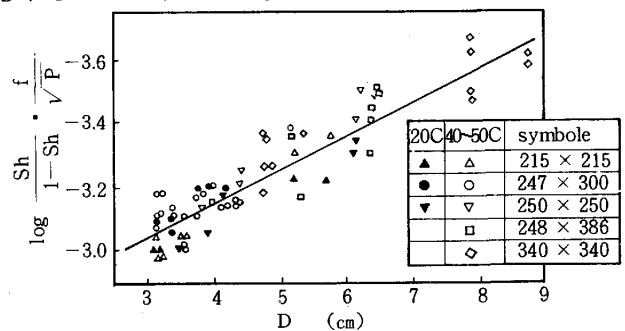


Fig. 8 Relation between $(sh/1-sh) \cdot (f/\sqrt{P})$ and D

数である。シェル厚による補正項は、攪拌力の評価段階でのシェル厚による磁力の減衰の取り扱い、および溶鋼温度の変化による流動性への影響によるものと考えられる。Fig. 9 に計算値と実測値の対比を示良く一致している。(5) 式を用いることにより、負偏析が許容される限界の電磁攪拌条件が決まる。

5. 考 察

(2) 式および (5) 式により、等軸晶化と負偏析抑制の調和のとれた電磁攪拌条件の設定が出来る。一方、鋼材の用途による品質要求度の違い、鋼種による等軸晶化の難易、負偏析形成の程度などにより両者の条件を満たすことが困難なケースが発生することがある。

この場合には多段攪拌が極めて有力な手段となる。すなわち、多段攪拌の等軸晶化効果は Fig. 10 に 2 段攪拌の例を示すように、多段の攪拌力の和として評価出来る。一方、負偏析は各段の電磁攪拌の攪拌力によって決まるために多段化が有効である。尚、今後の課題として更に偏析改善を進めるためには、Fig. 1 に示した等軸晶と偏析度の関係にみられるバラツキの原因を明らかにし、より適正な条件を求める必要がある。このバラツキの原因としては等軸晶の大きさ、形態と偏析の関係、収縮孔の影響などが考えられる。

6. 電磁攪拌適用結果

ブルーム連铸に電磁攪拌を適用した結果、铸片の等軸晶率が増大し、中心偏析が低減することは言うまでもないが棒鋼製品の品質改善の 1 例として、自動車のリヤ、アクスルシャフト材の冷間押し出し加工時のシエブロンクラック防止について示す。

Photo. 1 に鋼塊材の Top 部においてシエブロンクラックの発生したリヤ、アクスルシャフトの断面と、電磁攪拌を実施した連铸材で欠陥の認められなかったものを示す。

Table. 2 には、製造条件別のシエブロンクラックの発生頻度を示すが、電磁攪拌の効果が歴然としている。

7. 結 言

ブルーム連铸の中心偏析対策として、電磁攪拌法を開発した。等軸晶化並びに負偏析形成の実験式により、各種要因の影響を定量化し、電磁攪拌条件の最適化をはかり、偏析改善を達成した。

参考文献

- 1) 例えば、川上公成：鉄と鋼（1981）67：P. 1080
- 2) “、鉄鋼基礎共同研究会、凝固部会「鉄鋼の凝固」（1977）
- 3) 高橋忠義、市川冽、工藤昌行、島原皓一：鉄と鋼（1975）61. P. 2198

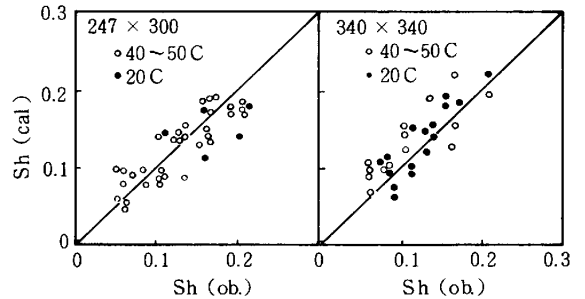


Fig. 9 Comparison of Sh (cal.) and Sh (ob.)

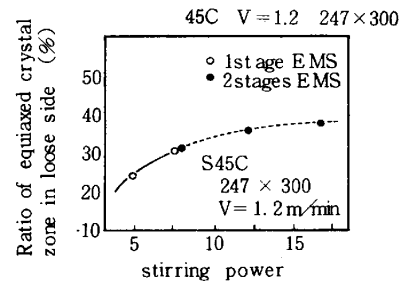


Fig. 10 Effect of 2 stages EMS

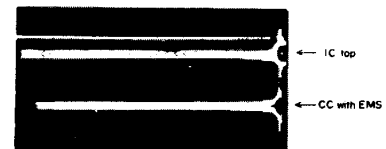


Photo. 1 Chevron crack of rear axle shaft

Table. 2 Frequency of chevron crack (rear axle shaft)

Casting	Spec	Frequency of Chevron Crack (%)		
		0	10	20
CC	with EMS	0 / 1983		
	without EMS	16 / 450		
IC	top	291 / 1584		
	middle and bottom	0 / 903		