

## 論 文

UDC 621.746.047 : 66.063.8 : 537.852.1 : 620.184.4

## 電磁攪拌による連続铸造材の凝固組織の改善

氏家義太郎\*・前出 弘文\*・伊藤 幸良\*・荻林 成章\*  
関 博\*<sup>2</sup>・和田 要\*<sup>3</sup>・伊藤 裕雄\*<sup>4</sup>Improving Solidification Structure of Continuously Cast Steel  
by Electromagnetic Stirring— Yoshitaro UJIIE, Hirobumi MAEDE, Yukiyo ITOH, Shigeaki OGIBAYASHI,  
Hiroshi SEKI, Kaname WADA, and Yasuo ITOH

## Synopsis :

The electromagnetic stirring is applied to continuous casting process of steel. A set of linear motor type stirrers is used for slab caster. High promotive force is fit for equiaxed crystallization of slab. The rotary motor type stirrer with 2 poles by 2 phases is used for bloom caster. Equiaxed crystallization of bloom is saturated in relatively low promotive force. Double stirrers system is more effective for equiaxed crystallization without heavy white band. Equiaxed crystallization by electromagnetic stirring reduces the centerline segregation of strand. The quality of products through continuous casting with electromagnetic stirring is therefore better than that through ingot casting.

## 1. 緒 言

電磁攪拌技術の連続铸造法への適用は、1950年における JUNGHANS の特許<sup>1)</sup>以来、多くの研究が行われている。我が国の、この分野における最初の報告は、すでに1960年に、牛島<sup>2)</sup>により行われている。しかしながら、連続铸造機の2次冷却帯は、ふく射熱も大きく、水冷をしている関係もあつて、電気設備にとつて極めて悪環境であるため、実用的な電磁攪拌技術が開発されたのは、1970年代に入ってからである。

その後、鋼の連続铸造法の技術的進展は、厚鋼板、機械構造用棒鋼、シームレス鋼管等の、高級鋼の連铸化という新たな段階を迎えるようになった。この際に、連続铸造材の特有の欠陥である中心偏析の解消が、大きな技術的課題となつた。新日本製鉄(株)では、このような状況を踏まえ、1971年以来、電磁攪拌技術の、鋼の連続铸造への適用に取り組んで来た。その結果、1973年に、実用的な電磁攪拌技術の開発に成功し、今や、社内のほとんどの連続铸造機に、電磁攪拌装置を附設するに至つている。

これまでになされている研究報告は、いずれも、電磁攪拌の有無に注目した記述的なものであるため、本論文では、電磁攪拌及び他の操業因子と凝固組織の関係について明らかとし、さらに、製品品質の改善にも触れる。

## 2. 電磁攪拌装置の概要

## 2.1 スラブ CC 用電磁攪拌装置

スラブ CC の場合、断面形状が扁平で、長辺の長いこと、ロールの背後からの電磁攪拌処理では、未凝固溶鋼と電磁攪拌コイルとの距離が大きく、攪拌力の減衰の著しいことの2つの理由により、ロール間に、ロールと平行に挿入するタイプの電磁攪拌装置を用いた。スラブ用の電磁攪拌装置の、連続铸造機への取付状況を Fig. 1 に示す。ロール間に挿入し得るように、リニア・モータ型の電磁攪拌装置とした。また、攪拌力を十分に確保するとの観点から、電磁攪拌装置は、銚片を介して対向するように2台配置した。

電磁攪拌装置の主仕様を、Table 1 に示すが、攪拌モードおよび周波数の自由度が大きいことが特徴的である。なお、以下で述べるスラブ CC に関する知見は、主

昭和 55 年 11 月 12 日 受付 (Received Nov. 12, 1980)

\* 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)\*<sup>4</sup> 新日本製鉄(株)本社 (Nippon Steel Corp.)

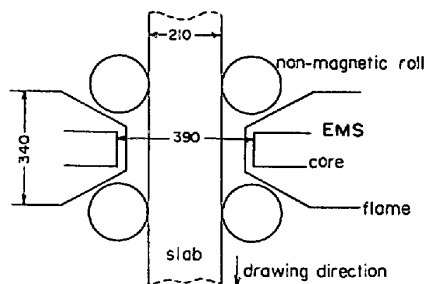


Fig. 1. Electromagnetic stirrer for slab caster.

Table 1. Electromagnetic stirrer for slab caster.



Core interval	390 mm	Coil current	550 A (Max.)
Frequency	4-16 Hz	Capacity	240KVA/150KW
Pole pitch	480 mm	Pole number	2
Position	Guide roll zone	Phase number	3
Stirring mode		continuous	on time 0-35sec.
		alternative	off time 0-35sec.

Table 2. Kimitsu No. 1 slab caster.

Hot run	September 1970
Maker	Demag/Hitachi Zohsen
Machine type	Curved mold type, 2 strands
Ladle capacity	250 t
Tundish capacity	20 t (One-tundish)
Machine length	22.8 m
Casting bow radius	10.5 m (One-piece)
Slab size	210 mm × 980 ~ 2 220 mm
Average casting speed	0.7 m/min

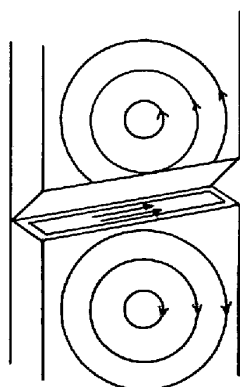


Fig. 2. Flow pattern caused by electromagnetic stirrer in slab caster.

に新日鉄君津製鉄所におけるもので、Table 1 の電磁攪拌装置は、同所第 1 連铸設備に附設したものである。Table 2 には、同連铸設備の主仕様を示す。

対向した 2 台の電磁攪拌装置は、同一方向に攪拌力が生ずるように用いているが、その際の溶鋼流動は、Fig. 2 に示すように推定される。すなわち、電磁攪拌装置の部分から、上下に分かれる 2 つの渦流である。このこと

は、同様の電磁攪拌装置を用いた、竹内らの実験<sup>3)</sup>により、ほぼ確認済みと考えられるので、本論では特にこれ以上言及しない。

### 2.2 ブルーム CC 用電磁攪拌装置

ブルーム CC は、スラブ CC と異なり、断面形状がほぼ正方形である。この形状では、回転磁界による電磁攪拌が簡単に適用できる。すなわち、ブルーム CC 用の電磁攪拌装置は、ロータリ・モータ型とした。当初、電磁攪拌装置を、铸型直下のサポート・ロール帯に設置しようと考え、ロールを小径化し、その背後に設置した。その後、適正な推力および設置位置を把握し、コイルをコンパクト化し、やや下方のガイド・ロール帯のロール間に挿入することとした。新日鉄室蘭製鉄所、第 2 連铸設備において技術検討を行つたが、その際の、電磁攪拌装置の取り付け状況を Fig. 3 に示す。電磁攪拌装置および連铸機の主仕様を Table 3 および Table 4 に示す。

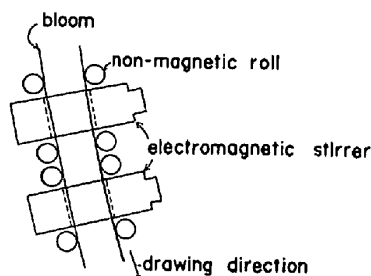


Fig. 3. Electromagnetic stirrer for bloom caster.

Table 3. Electromagnetic stirrer for bloom caster.

	Prototype (for test)	Practical type
Position	Support roll zone	Guide roll zone
Core interval	430 mm	380 mm
Pole/phase	2/2	2/2
Coil current	1 060 A (max.)	35 A (max.)
Capacity	760 kVA/250kW	30 kVA/15 kW
Density of magnetic flux	800 Gaus (max.)	230 Gaus (max.)
Frequency	50 Hz	50 Hz
Stirrer's choice	Single or double upper or lower	Double and lower

Table 4. Muroran No. 2 CC (bloom).

Hot run	October 1971
Maker	Hitachi
Machine type	Curved mold type, 4 strands
Ladle capacity	120 t
Tundish capacity	10 t (one-tundish)
Machine length	19.2 m
Casting bow radius	12.0 m (Open-piece)
Bloom size	165 mm × 165 mm ~ 247 mm × 300 mm
Average casting speed	0.9m/min (247 mm × 300 mm)

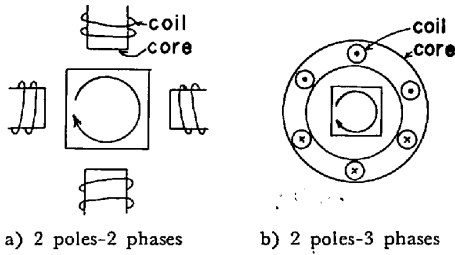


Fig. 4. Schema of rotary motor type electromagnetic stirrer.

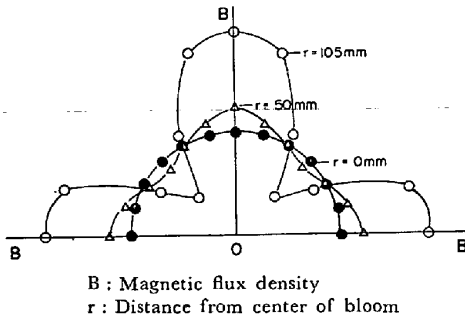


Fig. 5. Magnetic flux distribution of rotary motor with 2 poles by 2 phases.

単に、ロータリ・モータ型の電磁攪拌装置と言っても、3相2極型と2相2極型とが考えられる。Fig. 4に、この両型式の模式図を示す。銜片とコイルとを近づけ、攪拌力の減衰を防止するとの観点から、2相2極型のものを選択した。その際の磁束密度分布は、Fig. 5に示すように、面中央部が大きく、コーナー付近が弱いという特異なものとなった。結果的には、結晶の増殖という点で余り有効でないコーナー付近の流動が弱まると考えられ、森ら<sup>4)</sup>の報告しているコーナー付近のホワイト・バンドの強まりという不都合な現象は、全く観察されなかった。

### 3. 電磁攪拌による凝固組織の改善

#### 3.1 電磁攪拌による等軸晶の生成

電磁攪拌の主な目的は、連铸々片の等軸晶域を拡大し、中心偏析を軽減することにある。ここでは、連続铸造の作業上の諸要因および電磁攪拌の適用条件の2つが、連铸々片の等軸晶化に及ぼす影響について、スラブCCの場合と、ブルームCCの場合とに分けて述べる。

##### 3.1.1 スラブ CC

スラブ用电磁攪拌において、攪拌方向を逆転せず、連続的に一方方向とすると、等軸晶および溶鋼流動によつて生ずる負偏析(ホワイト・バンド)に偏りが認められることが明らかとなった。そこで、攪拌方向を逆転する交番モードを用いることとした。その際、電磁攪拌の条件

として変え得るものは、1) コイル電流 2) 周波数 3) 一つの攪拌方向の通电時間(オン・タイム)および休止時間(オフ・タイム)の3つに集約される。

まず、コイル電流の影響を Fig. 6 に示す。コイル電流の大きいほど、等軸晶率も増大している。また、等軸晶化には、サイクルタイム(オンタイムとオフタイム)も影響している。コイル電流という値では、攪拌力の指標として普遍的とはいえないので、攪拌力を圧力として表現することとし、溶鋼静圧に換算したスラブ厚中心の推力 (mmFe) を用いた。推力の導出には、オフラインで行った低融点合金の攪拌テストおよび非磁性金属板の受ける推進力の測定で確信した計算によつた。計算結果を、Fig. 7に示すが、電流値については、休止時間を考慮した、換算電流値を用いている。また、推力は同一電流値でも、周波数とともに増加する。

さて、この推力による等軸晶率の変化は、サイクルタ

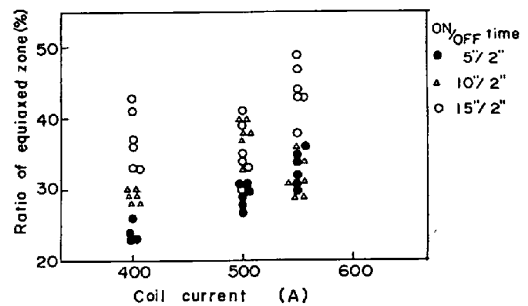
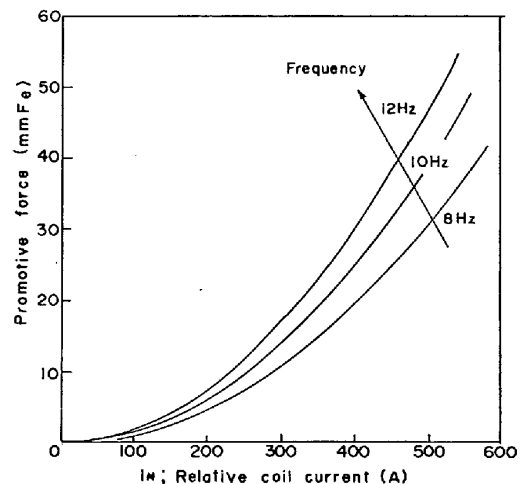


Fig. 6. Effect of coil current on equiaxed crystallization in slab.



$$I_M = I_0 / K$$

$$K = \sqrt{\frac{t_1 + t_2}{t_1}}$$

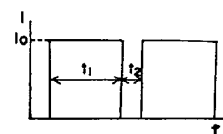


Fig. 7. Promotive force of electromagnetic stirrer for slab caster.

イムで整理してみると、Fig. 8 となる。同じサイクルタイムでは、推力の大きいほど等軸晶率が大きくなり、さらに、サイクルタイムの影響も大きい。ほぼ同じ推力における等軸晶率とサイクルタイムの関係は Fig. 9 のようになり、サイクルタイムの長いほど等軸晶率が增加する。以上の結果から、等軸晶率を増大させるには、推力を大きくし、かつ、サイクルタイムを長くとることが有効であることが明らかとなった。ただし、凝固組織の偏りを防止するために、サイクルタイムは余り長くはできず、特に、交番させずに一方向連続とすることは避けねばならない。

次に、鑄造条件の影響について述べる。鑄造温度は、連鑄々片の凝固組織と関係があり、特に、低温鑄造時には等軸晶組織が得られることはよく知られている。そこで、鑄造温度と等軸晶率の関係を Fig. 10 に示すが、等軸晶化には、鑄造温度よりも、電磁攪拌処理の効果の方が大きい。電磁攪拌処理により、操作性および品質面で問題のある低温鑄造を避けつつ高等軸晶率を得ることが可能である。

Fig. 11 に、引き抜き速度の等軸晶化に及ぼす影響を

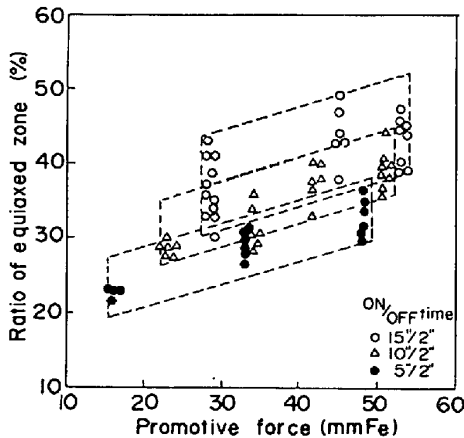


Fig. 8. Relations between promotive force and ratio of equiaxed zone of slab.

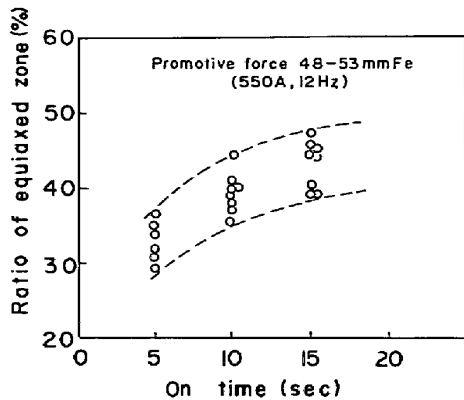


Fig. 9. Effect of "on time" on ratio of equiaxed zone of slab.

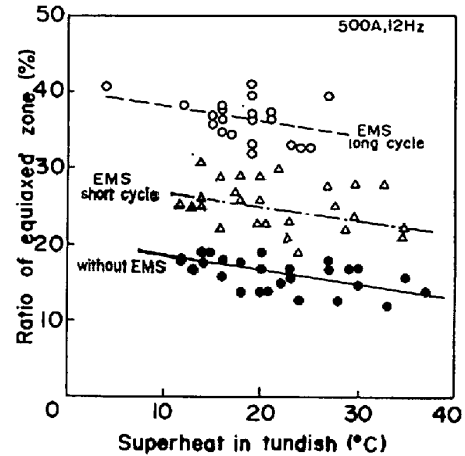


Fig. 10. Relation between casting temperature and ratio of equiaxed zone of slab.

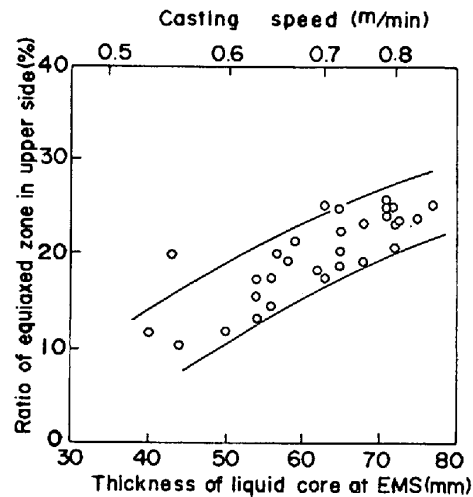


Fig. 11. Relation between casting speed and ratio of equiaxed zone of slab.

示す。鑄造速度が低下すると、攪拌時のシェル厚が増大する。したがって、未凝固溶鋼に加わる推力の平均値が減少するため、内質改善効果は減少する。未凝固厚みの増加（すなわち高速鑄造化）により、等軸晶率は増加するが、引き抜き速度が、0.80 m/min を越えると、やや減少の傾向が見られる。

スラブ幅も、等軸晶化と関係が認められた。Fig. 12 に、スラブ幅と等軸晶率の関係を示すが、スラブ幅の広いほど、等軸晶率は低下している。これは、電磁攪拌装置の有効コイル長が、960 mm とスラブ幅よりも短いために、広幅のスラブに作用する単位長さ当たりの攪拌力が、狭幅のスラブに作用するものと比べ小さいためと考えられる。このことから、攪拌力の確保が重要であることが明らかである。

### 3-1-2 プルーム CC

プルーム CC については、推力、鑄造温度、引き抜き

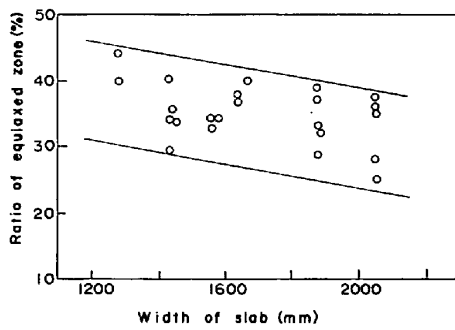


Fig. 12. Relation between width of slab and ratio of equiaxed zone of slab.

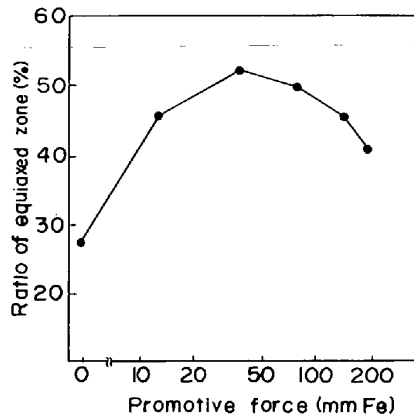


Fig. 13. Effect of promotive force on equiaxed crystallization in bloom.

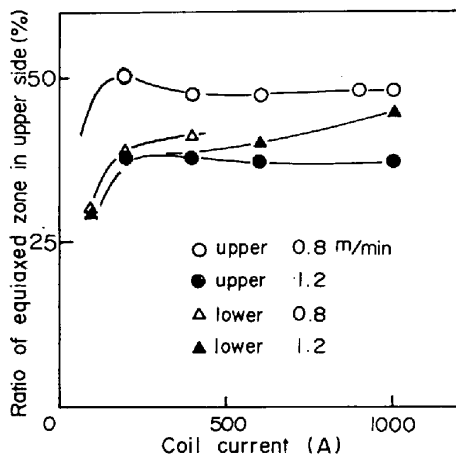


Fig. 14. Effect of electromagnetic stirrer's position and casting speed on equiaxed crystallization in bloom. (Superheat in tundish; 30°C.)

速度と、等軸晶率との関係について簡単に述べる。まず、Fig. 13 に、推力の等軸晶化に及ぼす影響を示した。ブルーム CC では、比較的低推力で、等軸晶率が飽和しさらに高推力では減少している。これは、回転攪拌流を用いているため、溶鋼流動範囲が、連铸機内の一部に限定されること、および、高推力時には、連铸機上部の高温度の残溶鋼を引き込むこと、の2つの原因によると考え

ることができる。

また、電磁攪拌装置の設置位置と、引き抜き速度の両者が等軸晶化に及ぼす影響も顕著である。Fig. 14 に見られるように、低引き抜き速度かつ上部攪拌という条件では、等軸晶化が進むが、高引き抜き速度では、等軸晶率が低下し、上部攪拌よりも下部攪拌の方が高等軸晶率となる。高引き抜き速度における等軸晶率の低下が、特に上部攪拌において顕著であるという事実にも、高温度の残溶鋼の引き込みということによって説明できる。

次に、鑄造温度の等軸晶化に及ぼす影響は、ブルーム CC の場合、Fig. 15 に示すように、顕著に認められるが、低推力のためと考えられる。電磁攪拌処理を行うと、等軸晶率が急激に低下する温度が、10~15°C 上昇している。

ブルーム CC においては、条系製品の素材を供給していることから、[C] 含有量の範囲が極めて広い鋼種構成となつている。この[C] 含有量により、等軸晶化の挙動が異なる。Fig. 16 に、[C] 含有量と、等軸晶率の関係を示すが、0.35% C に、等軸晶率のピークを有している。この原因は、必ずしも明らかではないが、Al-Ti 合金等でも言われているように、包晶反応が関与している<sup>7)~9)</sup>と推定される。固液共存層内で、包晶反応が生じている

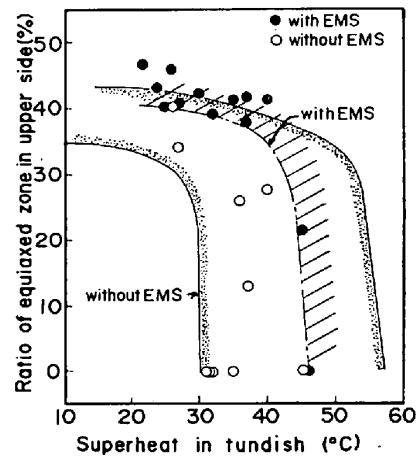


Fig. 15. Effect of casting temperature on equiaxed crystallization in bloom caster.

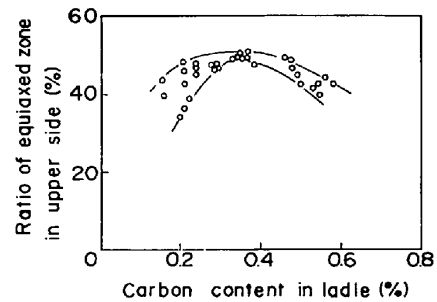


Fig. 16. Relation between carbon content of steel and ratio of equiaxed zone in upper side of bloom.

Table 5. Test conditions for white band.

Test No.	Position of stirrer	Casting speed (m/min)	Coil current (A)							Casting temperature (TD-ΔT °C)
			100	150	300	250	400	600	1 000	
A-1	upper	0.8			*		*			33-37
A-2		1.0	*	*	*			*		37-38
A-3		1.2	*		*			*	*	27-30
B-1	lower	1.0		*	*	*				31-42
B-2		1.2	*	*	*		*	*		23-28
B-3		1.5			*		*	*	*	12-29

(These tests are held on prototype EMS.)

と、デンドライトが不安定となり、デンドライトの分断遊離が容易になる<sup>10)</sup>こと、あるいは電磁攪拌によつて何らかの機構で生じた凝固核が、包晶反応生成物の形態、すなわち、外側がγ相で内側がδ相の2重構造をとり、凝固核の安定性が高まること、の2つの説明を与えることができるが、さらに詳しい検討が必要であろう。

3.2 電磁攪拌によるホワイト・バンドの生成

各系製品においては、棒鋼のように、切削加工して使うものが多く、ホワイト・バンドを問題視しなければならない。そこで、主としてブルームCCにおいて、ホワイト・バンドの生成の問題を検討した。その際の試験条件を、Table 5に示した。電磁攪拌コイルの設置位置、電流、引き抜き速度等を種々変化させ、ホワイト・バンド部の最大負偏析度に及ぼすこれらの要因の影響を定量化しようと試みた<sup>5)</sup>。

回転磁界型の電磁攪拌装置においては、半径方向に均一な磁束分布を仮定すると、攪拌力を溶鋼静圧に換算した推力  $H$  は、コイル電流  $A$  と残溶鋼半径  $X$  とが決まり、(1) 式のように表すことができる。なお、装置定数を  $\alpha$  とした。

$$H = \alpha A^2 X^2 \dots\dots\dots (1)$$

凝固界面における流速  $U$  を計算することは困難であるが、(2) 式のように考えることができる。

$$U \propto \sqrt{H} \propto AX \equiv U' \dots\dots\dots (2)$$

高橋ら<sup>6)</sup>によれば、凝固遷移層内の、溶鋼による洗浄範囲を固相率  $S_h$  までとすると、その値は、流速  $U$  と凝固速度  $f$  により求まり、(3) 式となる。

$$S_h / (1 - S_h) = 1.33 \times 10^{-4} U / f \dots\dots\dots (3)$$

そこで、高橋ら<sup>6)</sup>と同様に、平衡分配係数  $K_0$  と、見掛けの実効分配係数  $K_e$  (ホワイト・バンド部最大負偏析度) との関係(4) 式で与え  $S_h$  を求めた。なお、 $K_e$  はCについての値を用い、 $K_0 = 0.2$  とした。

$$K_e = 1 - (1 - K_0) S_h \dots\dots\dots (4)$$

$U'$ ,  $f$  の  $S_h$  に及ぼす影響を求めるため、 $S_h$  と  $U'/f$

の関係を Fig. 17 に示すが、 $S_h$  には、 $U'/f$  のほかに、引き抜き速度  $V$  も影響することが判明した。これはシエールによる攪拌推力の減衰を定量的に把握していないためであると理解された。引き抜き速度  $V$  をも含む形で整理して得られた式は、(5) 式のようになった。

$$S_h / (1 - S_h) = 7.94 \times 10^{-8} (AXV)^{1.5} / f \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式は、(3) 式とは異なっている。この  $S_h$  により、ホワイト・バンド部の最大負偏析度を求め、実測値との対応を見たのが、Fig. 18 である。実測値と計算値とはよく一致している。

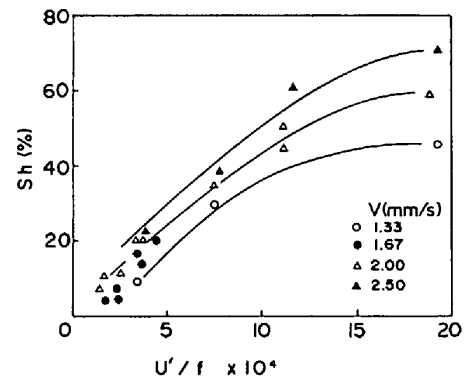


Fig. 17. Effect of casting speed on washing range ;  $S_h$ .

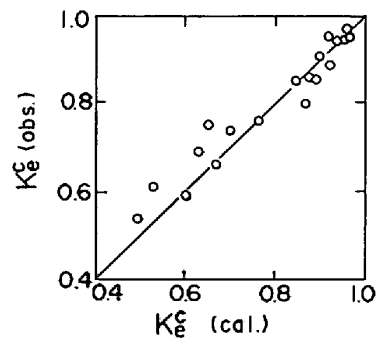


Fig. 18. Comparison between calculated value and observed value of effective distribution coefficient of carbon ;  $K_e$ .

次に、スラブ CC において観察した、ホワイト・バンドの発生に及ぼす铸造温度の影響について述べる。Fig. 19 に、铸造温度とサルファー・プリント上で検出されるホワイト・バンドの厚みとの関係を示す。ホワイト・バンドの厚みは、攪拌推力の増加と共に増加するが、铸造温度が高いほど増加することも明らかとなった。このことは、高温铸造において、溶鋼粘性の低下に伴い、流動影響範囲が、広がっていることを示唆している。

### 3.3 ホワイト・バンドと等軸晶化のバランス

ホワイト・バンドを問題とすることの多い、ブルーム CC において、ホワイト・バンドと等軸晶率の関係を調べ、かつ、両者の要求を調和せしめる方法として、2段攪拌法を検討した。

推力と、ホワイト・バンドおよび等軸晶率の関係を、Fig. 20 に示す。前節で述べたように、ホワイト・バンドの発生は、凝固速度と密接な関係があり、連铸機の上部和下部とを比較すると、上部の方が凝固速度が大きくホワイト・バンドの発生が抑制される。そのため、ホワイト・バンドを抑制しつつ等軸晶化が達成される推力の範囲は、下部攪拌よりも上部攪拌の方が広い。これに対し、同一電流でも2段攪拌を行うと、下部攪拌を行つてもなお、ホワイト・バンドと等軸晶率の適正な推力範囲が広がっている。

上部攪拌を行う際には、サポート・ロール帯のロール・ピッチ内に、電磁攪拌コイルを挿入することが困難であり、ロール背後からの電磁攪拌という、高推力を得ることが困難な手段しか選択できず、また整備面でも問題のある事は、明白である。また、上部攪拌が、高引き抜き速度に不適当なことは、前述したとおりである。このように、下部2段攪拌は、品質向上面と合わせて、設備技術面でもメリットが大きいのである。

## 4. 電磁攪拌による製品品質の向上

### 4.1 板系製品の品質改善

スラブ CC より得られる板系製品の、電磁攪拌による

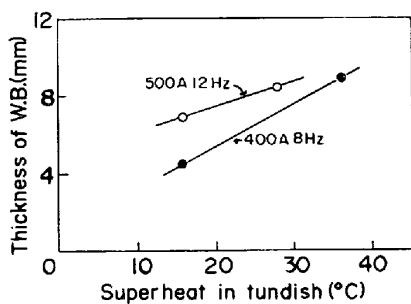


Fig. 19. Relation between casting temperature and thickness of white band of slab.

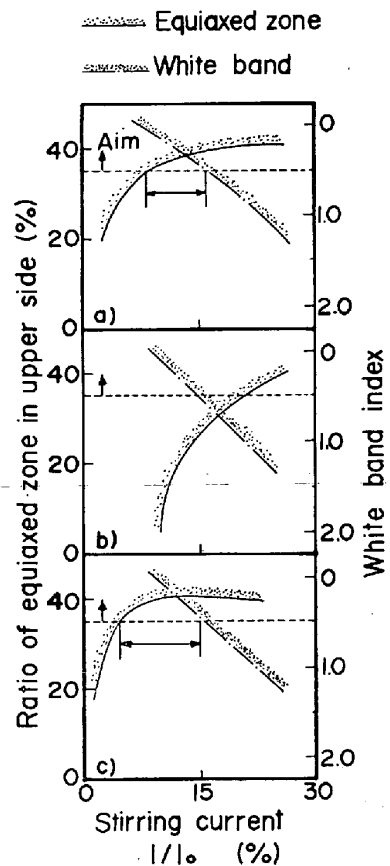


Fig. 20. Effect of stirring method on adequate range of stirring power in bloom caster. a) stirrer in upper position, b) stirrer in lower position, c) double stirrers in lower position. ( $I_0$ ; coil current of a certain magnetic flux density.)

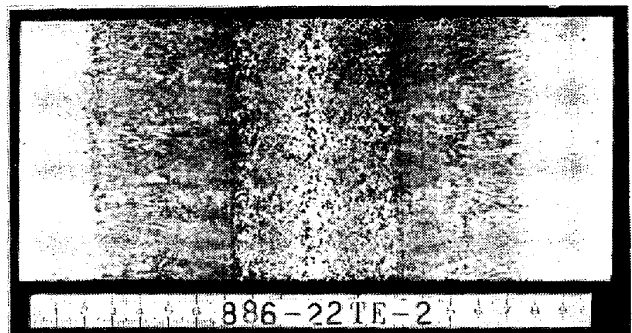


Photo. 1 Macrostructure of continuously cast slab with EMS.

品質向上について述べる。まず、スラブのマクロ組織の改善について、Photo. 1 に示すが、電磁攪拌の適用により、ホワイト・バンドの内側がほぼ全て等軸晶となる、大幅な凝固組織の改善が達成された。サルファープリントでの中心偏析評点と等軸晶率との関係を、Fig. 21 に示す。電磁攪拌による中心偏析の改善は、異常なバルジングのない場合には、等軸晶化と極めて密接な関係があ

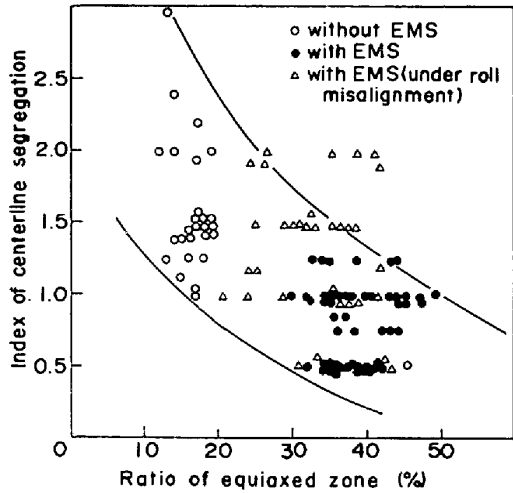


Fig. 21. Relation between ratio of equiaxed zone and centerline segregation of slab.

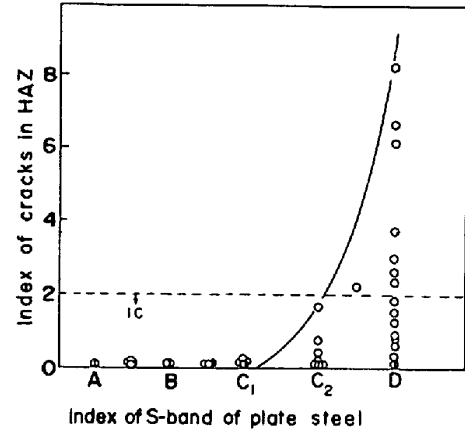


Fig. 22. Relation between centerline segregation of plate steel and cracks in HAZ (heat affected zone).

る。

厚板は、良好な溶接性を要求されることが多い。溶接性の指標の1つとして、HAZ (Heat Affected Zone) における熱応力割れを見ると、Fig. 22 に示すように、厚板サルファーバンド評点と対応している。このことから明らかなように、電磁攪拌による中心偏析の軽減は、厚鋼板の溶接性向上に有効である。

高炭素鋼板においては、さらに著しい品質改善効果が認められた。Fig. 23 に、高炭素鋼板の冷間打ち抜き加工時の2枚割れ (lamination) の発生と、取鍋P濃度および板厚中心部のPのマイクロ偏析最大濃度との関係を示す。電磁攪拌により、同一取鍋P濃度に対し、鋼板中心部のPのマイクロ偏析が減少し、その結果、2枚割れを抑制することができた。

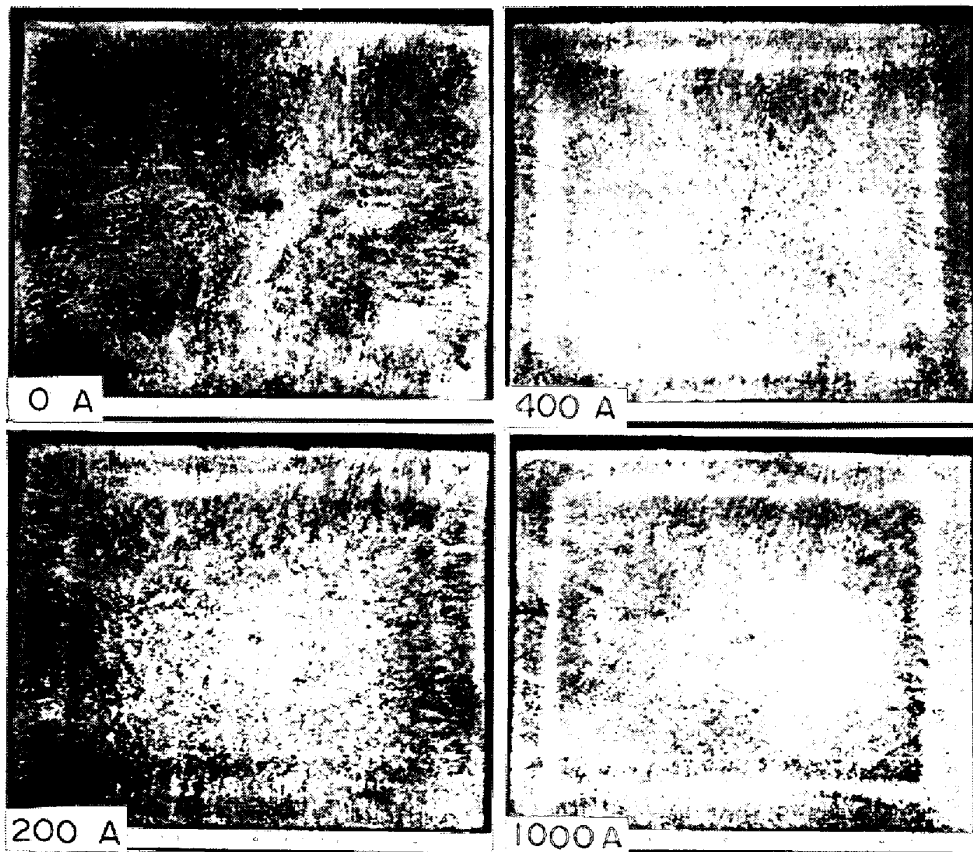


Photo. 2 Macrostructure of continuous cast bloom with EMS.



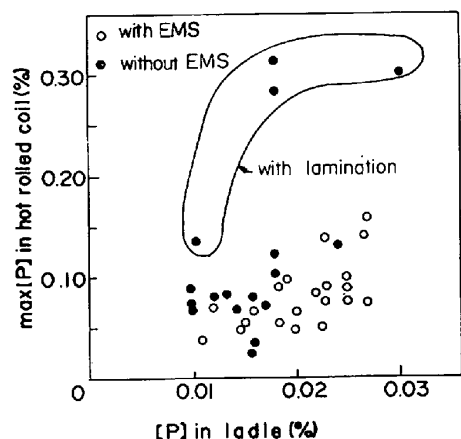


Fig. 23. Improvement of lamination by electromagnetic stirring. (High carbon sheet steel)

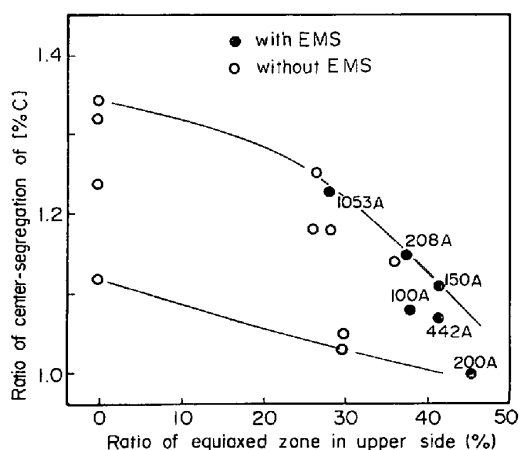


Fig. 24. Improvement of center-segregation of continuously cast bloom by electromagnetic stirring.



Photo. 3 Chevron crack of rear axle shaft.

4.2 条系製品の品質改善

条系製品においては、中心偏析により、中心部の延性が低下し、中心部に引張応力のかかる冷間加工（押し出しや引き抜き）時に欠陥が生ずることが、連铸材の有する問題であった。Photo. 2 に、種々のレベルの推力で電磁攪拌を行った際のブルームの macros 組織を示す。電磁攪拌の適用により中心偏析が軽減している。Fig. 24 に、ブルームの中心偏析度と等軸晶率の関係を示す。等

Table 6. Frequency of Chevron crack (rear axle shaft).

(Rear axle shaft is made by hot heading and cold extrusion process. Chevron cracks appear in cold extrusion process.)

Casting	Spec.	Frequency of Chevron crack (%)			
		0	10	20	30
CC	with EMS	0/1983			
	without EMS	16/450	■		
IC	top	291/1584	■	■	
	middle & bottom	0/903			

軸晶率の大きいほど、中心偏析度も低下しており、電磁攪拌の効果の大きいことがわかる。

条系製品の品質改善の 1 例として、自動車のリア・アクスル・シャフト材の冷間押し出し加工時の、シェブロン・クラックについて述べる。Photo. 3 に、鋼塊材の top 部においてシェブロン・クラックの発生したリア・アクスル・シャフトの断面と、電磁攪拌を適用した連铸材で発生認められなかつたものと示す。Table 6 に、製造条件別のシェブロン・クラックの発生頻度を示すが、電磁攪拌を適用した連铸材の優位性は明白である。リア・アクスル・シャフト材では、連铸材の品質が、鋼塊材を凌駕したと言えよう。

5. 結 言

鋼の連続铸造法に、電磁攪拌技術を適用した。スラブ CC とブルーム CC とで、それぞれに適した方法を選択し、以下の知見を得た。

(1) スラブ CC においては、リニア・モータ型の電磁攪拌装置を用い、攪拌方向を逆転させながら、高推力という条件を選ぶことで、高等軸晶率を得ることができた。

(2) スラブ CC においては、铸造温度の影響と比較し、電磁攪拌による等軸晶化の効果が大きく、低温铸造を行わなくとも、高等軸晶率を得られ、中心偏析も大幅に改善された。

(3) ブルーム CC においては、ホワイト・バンド(溶鋼流動による負偏析帯)を抑制し得る低推力において、等軸晶化が飽和する。さらに、ホワイト・バンドを抑制して高等軸晶率を得るには、2 段攪拌法が有効である。

(4) ブルーム CC においても、電磁攪拌により、等軸晶組織の得られる铸造温度領域が 10~15°C 拡がり、低温铸造せずとも等軸晶化が達成できるようになった。

(5) 電磁攪拌による中心偏析の改善は顕著で、リア・アクスル・シャフト材のように、連铸材の品質が、鋼塊

材を凌駕したと言い得るものもある。

文 献

- 1) 特公昭 31-9858
- 2) 牛島清人: 東京大学学位論文 (1960)
- 3) 竹内英磨, 森 久, 池原康允, 駒野忠昭, 柳井隆  
司: 鉄と鋼, 66 (1980) 6, p. 638
- 4) 森 隆資, 綾田研三: 神戸製鋼技報, 29 (1980)  
3, p. 16
- 5) 田代 清, 伊藤幸良, 前出弘文, 高尾滋良: 鉄と  
鋼, 63 (1977) 4, S 126
- 6) 高橋忠義, 市川 冽, 工藤昌行, 島原皓一: 鉄と  
鋼, 61, (1975) 9, p. 2198
- 7) I. MAXWELL and A. HELLAWELL: Acta, Met.,  
23 (1975), p. 901
- 8) G. W. DELAMORE and R. W. SMITH: Met.  
Trans., 2 (1971), p. 1733
- 9) F. A. CROSSLEY and L. F. MONDOLFO: J.  
Metals, 3 (1951), p. 1143
- 10) P. A. BIBBY and J. BEECH: JISI., 211 (1973)  
p. 290