

論 文

UDC 621.746.047 : 621.746.585 : 621.746.01 : 620.184

高炭素鋼連铸における鑄片液芯の電磁攪拌*

岩田 齊**・山田勝彦***・藤田照夫**・林 享 三***

Electromagnetic Stirring of Molten Core in Continuous Casting of High Carbon Steel

Hitoshi IWATA, Katsuhiko YAMADA, Teruo FUJITA, and Kyoze HAYASHI

Synopsis:

Two-pole rotary field type electromagnetic stirring was applied in the secondary cooling zone in order to reduce center-line segregation of continuously cast high carbon steel billets.

The results obtained are summarized as follows.

- (1) A homogeneous macrostructure of equi-axial crystals are obtained by the stirring.
- (2) It is proved that the stirring is more effective at higher casting temperatures, by a statistical method which is presented to accurately evaluate the degree of center-line segregation of continuously cast billets.
- (3) Tensile properties of products, PC wire, are improved by the stirring.

1. 緒 言

連続鑄造鑄片の品質面において中心偏析は重要な欠陥の一つである。特に高炭素鋼の場合、中心正偏析部は容易に共析炭素量を超えるのでセメント・ネットが析出しやすいことに加えて他の成分、不純物の偏析、収縮孔やセンターポロシティと重なって素材の脆化が大きい。そして著しい偏析は伸線加工性および鋼線の引張り特性その他の品質低下を招くことはしばしば経験するところである。

特に小断面連铸材はこれらの点に関して不利とされ、品質が特に問題となる品種に対しては一般に小断面連铸をさせて大断面の鑄片のブレイク・ダウン方式が採用されることが多い。しかしながら連铸本来の目的から小断面連铸で各種欠陥を解決するのが好ましく、従来この方向で多くの研究がなされ、鑄造条件と凝固組織・中心部欠陥との関係について明らかにされつつある。

中心偏析の生成機構はさておき、鑄片内部に均質な等軸晶が広く分布する場合には中心偏析の程度は小さいことが共通した結論といえる。

鑄片組織の等軸晶化の一方法に鑄片液芯の電磁攪拌法がある。ARBING, ROSSI¹⁾の特許以後いくつかの研究が

あるが、O. SCHAABER, S. JUNGHANS の特許²⁾³⁾を使用した POPPMEIER ら⁴⁾の研究は実操業に適用して初めて深く検討されたものとして注目される。かれらは電磁攪拌によって鑄造組織と偏析の改善に成功したが装置上の弱点から非金属介在物の増加が起り現在中断されていると伝えられる。ソ連の研究⁵⁾においても電磁攪拌は組織の密化に有効だが凝固完了まで攪拌を継続すべきであると主張して大出力の設備を必要としている。

著者らはこれらの装置上の問題を解決できる新しい簡単な回転磁界装置を試作し、115 mm φ の線材用小断面連铸に適用した結果、高炭素鋼線が改善されるのがわかったのでその内容を報告する。

2. 電磁攪拌方法

2-1 電磁攪拌方式の決定

電磁攪拌装置の試作にあたってまずどの方向の攪拌流を与えるかが問題になる。鑄造欠陥の防止に適切な攪拌流の方向については明らかでないが液芯の細長いビレット用連铸では中心軸のまわりの回転流が装置上および攪拌の均等性の点では適切と考えられる。過去の研究においても回転磁界方式が採用されており、著者らもこの前例を受けついで。

* 昭和 48 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 49 年 12 月 6 日受付 (Received Dec. 6, 1974)

** 住友電気工業(株)研究開発本部 (Sumitomo Electric Industries Ltd.)

*** 住友電気工業(株)特殊線事業部 (Sumitomo Electric Industries, Ltd., 1 Miyahigashi Koyo Itami 664)

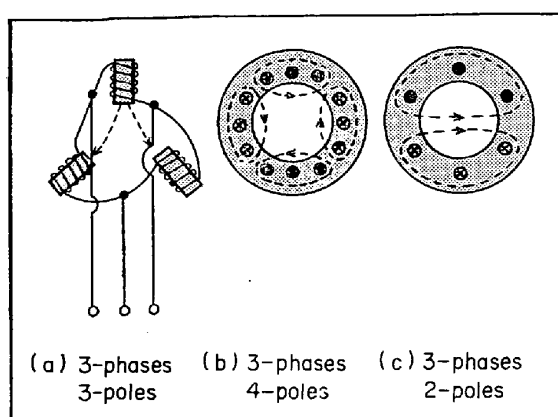


Fig. 1. Type of rotary field.

Fig. 1 に示すように回転磁界式電磁コイルにおける磁束分布はコイルの極数と密接に関係している。

Fig. 1 (a) の JUNGHANS²⁾ の装置では 3 相 3 極となつてゐるため回転磁界中心部の磁束はその周辺に比べて弱く、したがつて凝固殻がすでに厚くなつてゐる 2 次冷却帯に電磁コイルを取付けても電磁力が液芯に作用できなかった原因となつてゐる。

Fig. 1 (b) のソ連の例では 4 極回転磁界が使用されてゐて、磁界中心部の磁束は 3 極よりいつそう薄められてゐる。それを補うため大容量の装置が必要とされるし効率が極めて悪い。攪拌力が弱い結果と考えられるが凝固完了まで攪拌を続けるのが好ましいと主張してゐる。

Fig. 1 (c) は著者らの方式で 2 極回転磁界になつてゐる。構造は 3 相 2 極の誘導モーターの固定子と同様である。2 極の場合磁束は鉄心内側の円柱状空間の直径にそつて通るので中心部の磁束密度は大きく効率的で、したがつて小型、小容量の装置でよい。

2.2 周波数の選定

回転磁界内の導体の受ける電磁力は近似的には導体の導電率、導体の直径、磁束密度および磁束の回転速度にそれぞれ比例すると考えられる。連铸鋳片液芯のように凝固殻でとり囲まれてゐる場合、そこである程度の誘導損が生じ、その量は周波数が多い、すなわち磁束の回転速度が大きいほど増加すると考えられるので攪拌力に対する最適周波数については単純には求めにくい。装置の簡略化もあつて商用周波数を使用した。

2.3 必要磁界の強さ

鋳片凝固殻を貫通して液芯に回転力を与える磁界中心部の磁束密度の見積りについて検討する。

2 極回転磁界中心部の磁束密度は近似的にコイルのアンペア・ターン数に比例し、極間距離すなわち鉄心内径に反比例する。したがつて鉄心内径は小さい方が好まし

いが鋳片断面寸法と装置の防熱・防水用構造物のスペースによつて制限されるので 200 mm 径以下にはなしえなかつた。

次に鋳片と鉄心間の構造物による磁束の遮蔽は最少にする必要がある。そのためには構造物の導電率が小さくかつ透磁率が小さいことが条件になる。

磁束中心部における必要磁束密度については次項の水銀モデルと溶鋼を対象とした予備的ないくつかの試験から 50 ガウス程度では攪拌は得られず 300 ガウスで液芯が激しく攪拌されることを知つた。

2.4 攪拌流の強さの推定と攪拌時間の決定

攪拌によつて変化すると予想される凝固組織や偏析を検討するにあつて攪拌流の速度の概数が必要となるであらう。数百ガウス、3 600 r.p.m. の回転磁界によつてどの程度の回転流の速度が得られるかを水銀を用いる方法で推定してみた。

回転磁界中心部に 40 mm 径の水銀柱を置きその渦の深さを測定して強制渦の方程式 (1)⁶⁾ から回転数を求めた。

$$N = 60 \cdot \left(\frac{g y}{2 \pi^2 x^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで

- N = 強制渦の回転数 (r.p.m.)
- g = 重力の加速度 (980 cm/sec²)
- x = 渦の半径 (cm)
- y = 渦の深さ (cm)

磁束密度 B (G) と回転数 N (r.p.m.) との間には精度の高い直線関係が認められ、液芯径 40 mm の場合には (2) 式のようなつた。

$$N = 3.32 B \quad \dots \dots \dots (2)$$

(2) 式から 300 G 下で 1 000 r.p.m. が得られ、これは約 2 m/sec の周速になる。実際の連铸においては角状の液芯横断面、凝固前面の凹凸、および水銀より大きい溶鋼の粘性抵抗などを考えると周速は相当落ちるものと推定される。

次に攪拌時間の決定に当たつて、攪拌による混合や結晶先端の破砕などの効果はおもに周速に依存すると仮定し、一定の回転磁界内で最大の周速が得られる時間、すなわち定常渦に達する時間を求めた。上記の水銀の渦の観察でその時間は 8~10 sec であり、これに基づいて液芯が約 10 sec 間電磁作用を受けるよう鉄心の鋳片引抜方向の長さを 400 mm とした。実際には磁束は鉄心上下にも波及して 14 sec 間攪拌された。装置は誘導モーターの固定子と同様の構造を有しその出力は 30 kVA である。

2.5 攪拌装置の設置部位

攪拌装置を連铸機の中の部位に設置すればよいかという問題についてはすでに重要なヒントが出されている。すなわち POPPEMEIER⁴⁾ らは2次冷却帯での攪拌を望んだが装置の原理上不可能であつたこと、およびモールド周囲かモールド直上に電磁コイルを置くと凝固組織の改善には効果があつたが铸込面に渦が生じ、スカムが渦の中心に集まり、これが铸込流によつて溶鋼内にたたきこまれ、非金属介在物が増加したことを報告している。そのうえ銅製モールドによる磁束の吸収という問題もある。したがつて、2次冷却帯に設置すればこれらの弱点を解消できると考えられる。

一方、小断面連铸での偏析の生成にはブリッジの形成が大きく影響するものと考えられており、この点からブリッジの基部が形成されるまでに攪拌するのが適切だと推定される。さらに凝固速度、温度勾配および凝固前面の形態その他を考えねばならないが推定困難であつたので予備試験的に2次冷却帯のいろいろな位置に装置を1台または2台取付け品質効果を比較したが決定的な差異は認められなかつた。以上から铸込面下2.5mの部位に装置を取付けた。

3. 電磁攪拌の効果

3.1 実験方法

Table 1 に連铸機と操業条件の概要をまとめる。铸片品質におよぼす電磁攪拌の影響をより正確に求めるため攪拌以外の製鋼、铸造条件が同一となるよう2ストランド連铸機の片側のみを攪拌処理して比較を行なつた。

適用鋼種は SWRS 77 A, B, または, SWRH 77 A, Bである。

通常の操業下では小断面連铸材の凝固組織は铸込温度によつて第1義的にきまり、引拔速度やスプレイ強度は第2義的な影響しかもたないことが知られているので铸込温度のみ種々の水準をとつて実験した。

Table 1. Continuous casting machine and electro-magnetic stirring equipment.

Type of C.C. machine	Mitsubishi-Olsson, vertical-bending
No. of strands	2
Mold	for billet, 115 mm square
E. M. S. equipment;	
power	30 kVA, 400 G
structure	similar to stator of motor
coil	3-phase, 2-poles, 3 600 r.p.m.
length of stirring	560 mm
stirring time	14 sec
setting position	2.5 m under meniscus
Casting temp.	liquidus+0~30°C
Casting speed	2.1~2.4 m/min
Spray water	0.9 l/kg of steel

Table 2 に供試材铸片の化学成分と铸込条件を示す。液相線温度の算出には、平居式⁸⁾を使用した。

3.2 電磁攪拌による铸片マクロ組織の変化

3.2.1 铸込温度の高い場合

Photo. 1 (a) は铸込温度の高い铸片 H.C, H.E の縦断面マクロ組織を示す。攪拌による組織変化は、攪拌時において凝固前面に相当する位置に数 mm 幅の白っぽい帯状組織が現れる。以後白色帯という。

従来方式の铸片 H.C においてはチル晶、柱状晶、分岐樹枝状晶と少量の等軸晶よりなり、中心にブリッジが存在しているが、攪拌された H.E の凝固組織においては白色帯内側はほぼ均質な等軸晶のみになり、铸片長さ方向への均質化が著しい。ブリッジ下の収縮孔は多孔質となつて分散されているが収縮孔が完全に消滅しているとはいえない。

铸片 H.C におけるブリッジ下の強い偏析部は攪拌によつて V 偏析へと変化している。

3.2.2 铸込温度の低い場合

Photo. 1 (C) は铸込温度の低い铸片 L.C, L.E の組織を示す。この場合、攪拌を受ける以前に凝固した部分

Table 2. Chemical composition and casting condition of test billets.

Sample	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Super heat ΔT (°C)	Stirring (gauss)	Casting speed (m/min)
H. C H. E	0.75	0.28	0.58	0.014	0.017	27	0 280	2.4 2.4
M. C M. E	0.74	0.26	0.84	0.009	0.014	10	0 280	2.4 2.4
L. C L. E	0.76	0.28	0.85	0.011	0.014	2	0 280	2.4 2.4

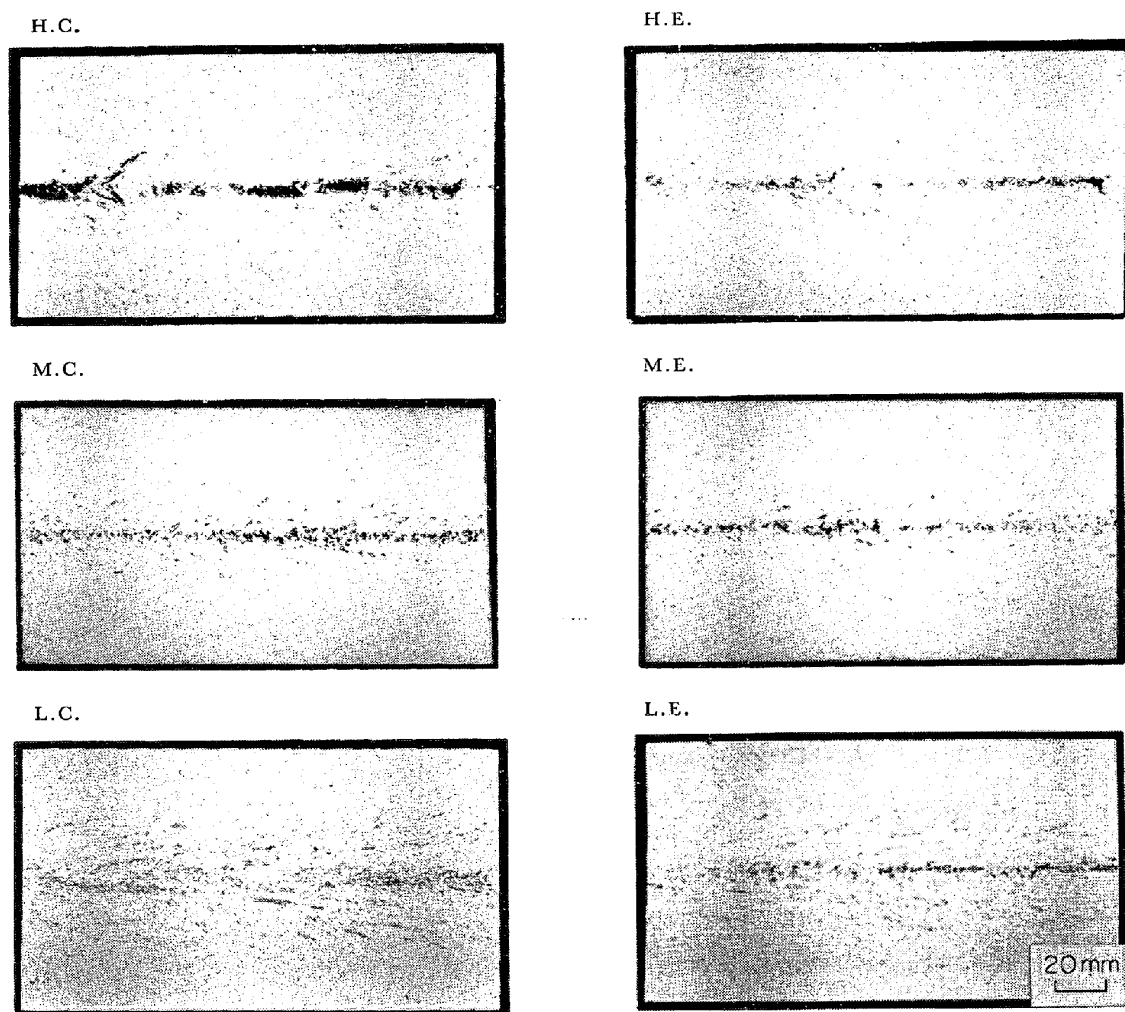


Photo. 1. Macrostructure in longitudinal section of billets. Left; conventional, Right; stirred.

がすでに柱状晶ではなく等軸晶になっている。したがって白色帯内側は特に変化することなくほぼ均質な等軸晶である。

3.2.3 白色帯

Photo. 2 は鑄片 H.E, L.E の白色帯の横断面マクロ組織を示す。高温鑄込においては白色帯内部のデンドライトの樹枝は、白色帯外側からの延長の型態を示しており、白色帯の内側境界からデンドライトの成長方向が回転流の上流方向に傾斜している。その境界では特に白色が目だっている。低温鑄込においては白色帯の外側と内部は何ら異ならないが白色帯内部と内側の境界でわずかに差異がみられる。以上から 14 sec 程度の攪拌においては白色帯はおもに固液共存域において液相が攪拌によつてかき流された部分であることがわかり、この白色帯の幅は固液共存域の幅と攪拌流の強さに依存することが推定される。

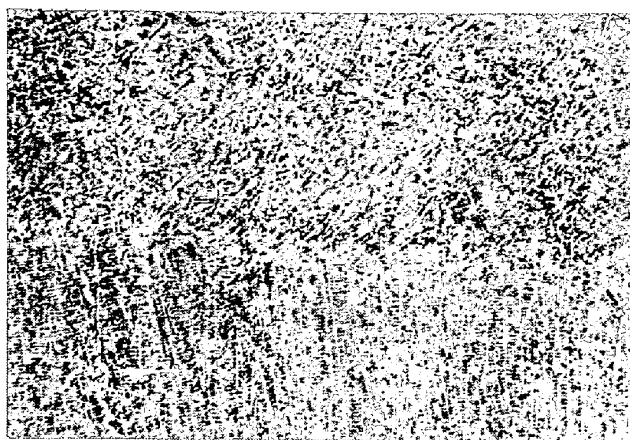
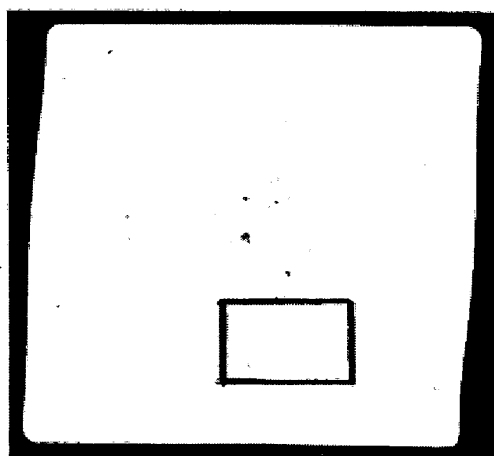
3.3 電磁攪拌による中心マクロ偏析の変化

3.3.1 中心偏析の定量的評価法の試み

偏析は鑄片横断方向のほかに鑄片長さ方向にも多種多様な分布をもっているのでその把握には簡単な一次元的解析では取扱いえない困難さがある。そのため従来標準マクロ組織との比較による判定法^{7),9)}や中心ドリル・サンプリング法が試みられているが十分満足のいくものではない。著者らは偏析の実態を明らかにする過程で評価方法を検討した。

初めに中心偏析におよぼす攪拌の影響を明らかにする一手段として、鑄肌面から中心軸への溶質成分の変化を調べた。ブリッジ間隔を考え鑄片から長さ 200 mm をとり中心軸を含む縦断面上のみからシェーパーにより長さ方向と平行に幅 2.5 mm, 深さ 1.0 mm, 長さ 200 mm のサンプルを鑄肌面から順次中心軸に向つて 2.5 mm ごとにサンプリングした。

H.E.



L.E.

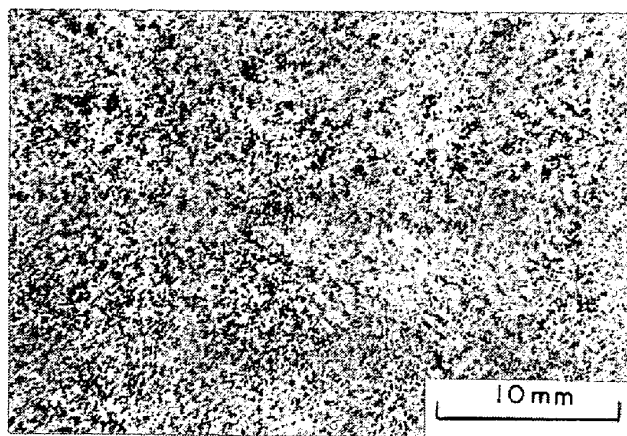
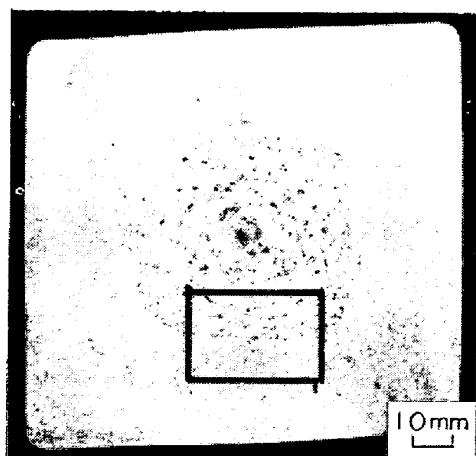


Photo. 2. Macrostructure of white band in transverse section of billets.

Fig. 2 はこのようにして求めた鑄片横方向の偏析を示す。図には 6 種の供試材について C, P, S, Mn の変化を取上げている。

図から

(1) 中心偏析は中心部 10~15 mm 径にあり、これからドリル法で中心偏析を求める場合、ドリル径が大きな意味をもつことがわかる。

(2) C, P, S, Mn などの各成分は中心領域の周囲で若干の負偏析を示し、その分が中心部に濃縮されている。

(3) 鑄込温度が高いほど中心偏析率が大きくなる。

(4) S, P, C, Mn の順位で偏析率が大きい。

(5) 攪拌による中心偏析率の著しい変化は図に関しては認められない。

(6) 白色帯は負偏析となつている。負偏析帯の幅を 3 mm, 偏析率を 0.9 とすると白色帯内側は平均 0.02

の偏析率の増加となる。

Fig. 3 は C と P, S, Mn の偏析率のそれぞれの関係をプロットしたものである。図において C の偏析率と P, S および Mn のそれとはそれぞれ強い相関が認められる。この関係から C のみの分析により他の成分の偏析率を推定することができる。

Fig. 2 のデータだけでは中心偏析に関して各供試材の優劣を判定することはできない。なぜなら各分析点は鑄片長さ方向 200 mm についてだけの平均組成を示しているだけだからである。そこで中心部 C% の鑄片長さ方向の変化を知る必要がある。この目的のため鑄片中心部からドリル径 5 mm, 鑄片長さ方向 200 mm を連続して 5 mm ごとにサンプリングした。

Photo. 3 に C の中心偏析率の鑄片長さ方向の変化を縦断面マクロ組織と対比させて示す。鑄込温度の高い鑄片 H.C においてマクロ組織から予想されるようにブリ

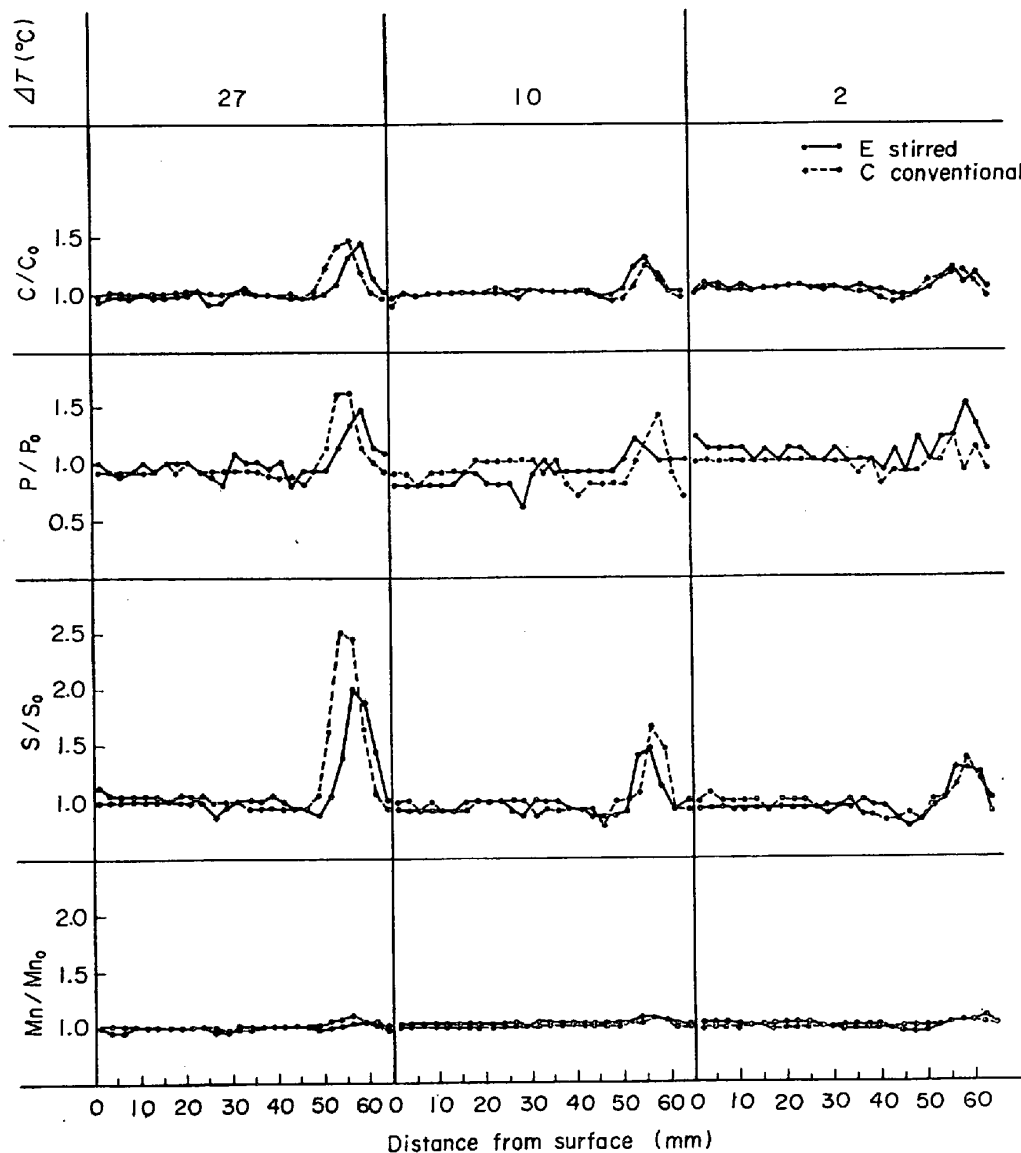


Fig. 2. Solutes distribution in transversal direction of continuously cast billets.

ッジ部とその上下で偏析率は大きく波状に変動していることがわかる。攪拌材 H.E ではブリッジに起因する偏析率の波状の変動こそないがやはり無視できないほどばらついている。鑄込温度の低い鑄片 L.C ではマクロ組織の均一性にもかかわらず中心偏析率は高温鑄込と同様に波状の変動がみられる。しかしその平均値は小さい。低温の場合も攪拌によつて波状変動がなくなっている。

以上の事実から中心部偏析率の程度を評価するにあたって2つの注意点が明らかになってくる。

第1に調査する鑄片の長さは少なくともブリッジ間隔と関係している中心偏析率の波状変動の1周期以上、すなわち数 10 cm は必要である。

第2に後工程において種々の問題となる偏析は通常局

所的な異常に著しい部分である。したがって中心偏析の平均値も重要だがどの程度の偏析率がどの頻度で存在しているかがいつそう重要になる。

Fig. 4はこの考えにそつて Photo. 3 中のデータをヒストグラムにまとめたものである。図から中心偏析率におよぼす鑄込温度と電磁攪拌の影響を Fig. 2 のシェーパー法よりも精度よく読みとることができる。すなわち

(1) 従来法の鑄片では鑄込温度の上昇にともない中心偏析の平均値と標準偏差はともに大きくなる。つまり局所的強偏析部が増加する。

(2) 攪拌材でも上記同様の傾向がみられるが従来法に比べて中心偏析率の標準偏差はかなり小さく、したがって、従来材でみられる程度の局所的偏析は少ないとい

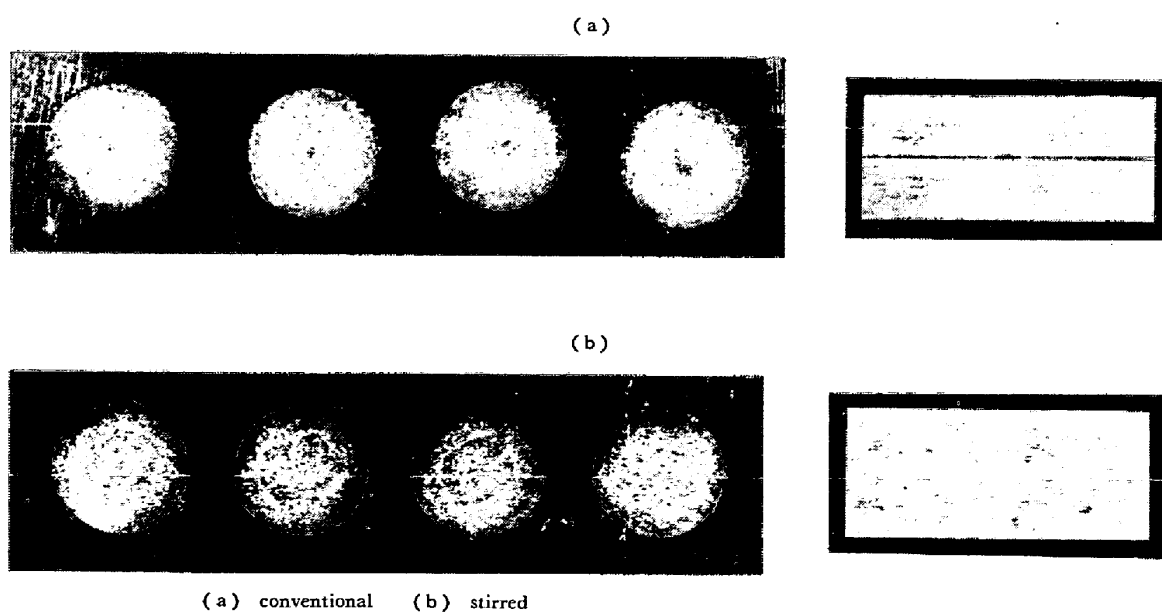
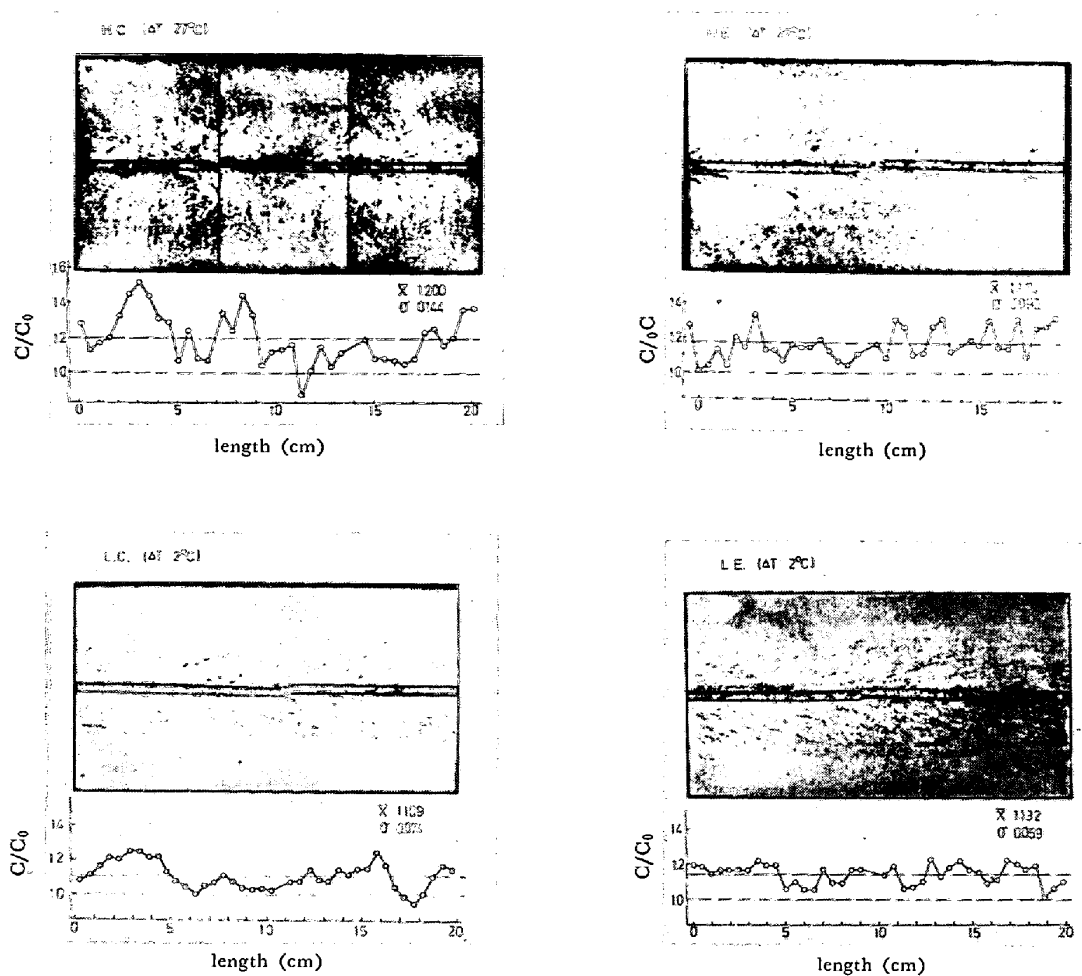


Photo. 4. Macrostructure of transverse and longitudinal section of 10 mm dia. rods.

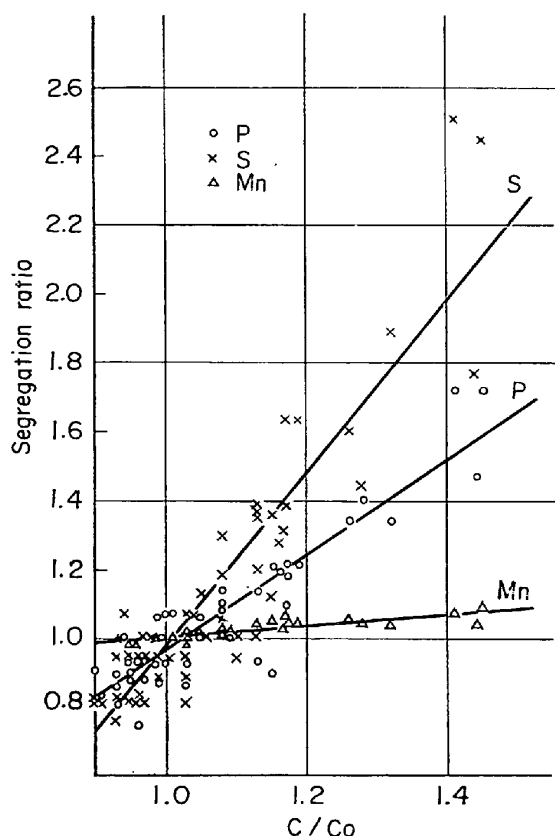


Fig. 3. Relation between C/C_0 and P/P_0 , S/S_0 , Mn/Mn_0 .

える。

Fig. 5 は中心偏析率の鑄片長さ方向に関する平均値とその標準偏差の関係を示す。従来法の鑄片については両者には相関が認められるが、攪拌材では σ が低くなるとともに両者の相関は弱くなっている。これから従来法の鑄片では平均値のみで偏析の程度をかなり比較できるといえるが攪拌材ではその標準偏差をも求める必要があることが示される。したがって、一般的には中心偏析の評

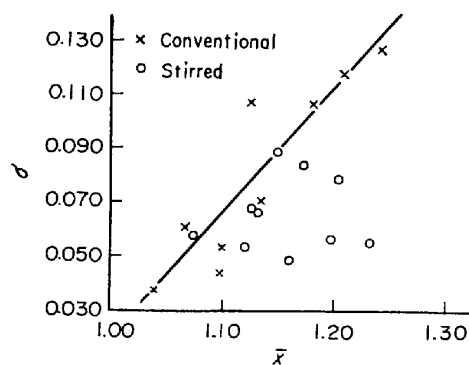


Fig. 5. Relation between standard deviation (σ) and mean value ($\bar{x}$) of center segregation ratio of C.

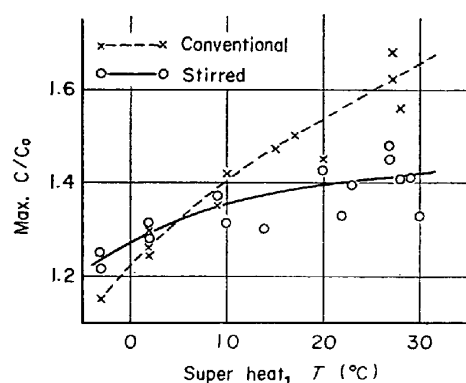


Fig. 6. Effect of casting on maximum segregation ratio ($\bar{x}+3\sigma$).

価にあたっては中心部の長さ方向の平均値とその標準偏差の両方をもつて行なうのが良いことになる。

3.3.2 中心偏析におよぼす鑄込温度と電磁攪拌の影響

各種の条件で鑄造した鑄片について、鑄片長さ約 600 mm を切出し、中心部から 5.0 mm 径のドリルで 25 mm ずつ連続して切粉を採取し、C 分析を行ない、そ

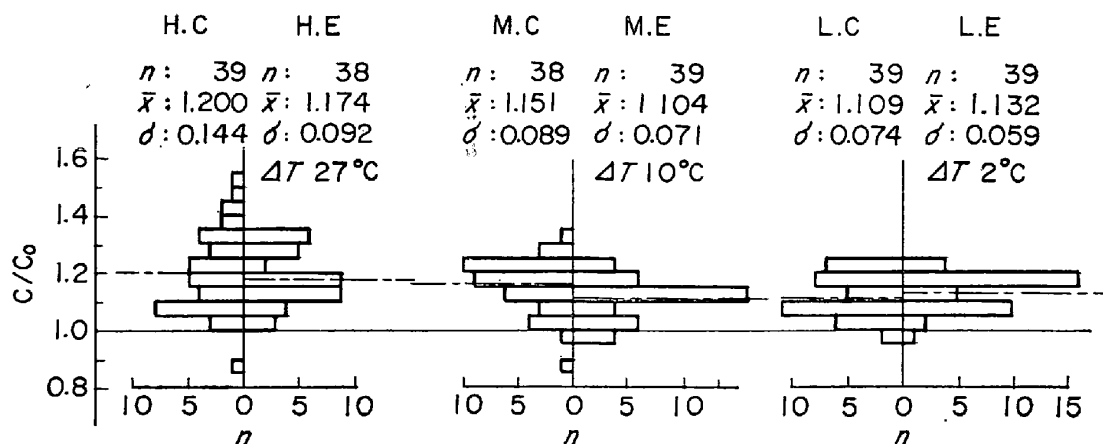


Fig. 4. Histogram of center segregation ratio of C in various casting conditions.

Table 3. Comparison of reduction in area of the rods subjected to lead-patenting.

Charge No.	C (%)	Mn (%)	Dia of rods (mm)	Stirring	No. of sample	R. A. (%)	Diff. (%)
1	0.77	0.88	10 〃	with no	5 〃	23.1 20.1	+3.0
2	0.75	0.83	〃 〃	with no	〃 〃	26.9 24.6	+2.3
3	0.76	0.85	〃 〃	with no	〃 〃	25.2 24.1	+1.1
4	0.78	0.86	〃 〃	with no	〃 〃	28.1 25.3	+2.8
5	0.77	0.86	〃 〃	with no	〃 〃	24.8 22.5	+2.3

これらの平均値, $\bar{C}$ と標準偏差, σ_c を求め $(C/C_0)_{\max.} \equiv (\bar{C} + 3\sigma_c)/C_0$ と定義して求めた最大偏析率におよぼす鑄込温度と攪拌の影響を求め Fig. 6 に示す。

なお, Fig. 4 より C の中心偏析率はほぼ正規分布をとるとみなせるので, 先に定義した $(C/C_0)_{\max.}$ 以上の局所的強偏析部の発生率は統計計算より, 0.14% であると推定できる。またこの方法は従来の方法すなわち標準マクロ組織との対比による評点法やシェーパーまたはドリルによる1点分析法に比較して精度が高く実用性が高いと著者らは考えている。

図から, $(C/C_0)_{\max.}$ は攪拌の有無にかかわらず鑄込温度の上昇とともに大きくなること, および鑄込温度の高いところで攪拌の効果が発揮されることがわかる。

3.4 線 材

著しい偏析をもつ線材の断面マクロ組織は Photo. 4 (a) に示すように中心部が黒っぽい。そのミクロ組織は通常セメント・ネットが存在し, 一般にオーステナイト粒度は周囲に比べて小さく, 細かい硫化物群がみられることもある。Photo. 4 (b) の攪拌材では白色帯が残存し, 黒い中心偏析模様は消滅もしくは軽減され多数の弱い線状偏析になつている。中心部に集中していた偏析の一部が攪拌によつて等軸晶群の間に分散された

めであろう¹⁰⁾。軽度の偏析は次工程のパテンティング処理によつて消滅するが著しいものは再びセメント・ネットが析出して加工性をそこなう。線材断面のマクロ組織によつても偏析をある程度評価することができ, 攪拌によつてその組織評点が向上するのを確認している。

Table 3 はパテンティングされた線材の引張試験における絞りの比較を示す。供試材は多数のチャージを対象に片側ストランドを攪拌, 他を無攪拌とし, 10.0 mmφ 線材を使用した。引張り強さは両者に差はなく絞りについては表から, 差は小さいが攪拌によつて向上していることがわかる。

3.5 鋼 線

線材中心部に偏析, 収縮孔などの欠陥があると冷間加工時に種々の事故が生じたり最終製品の品質を低下させるが高炭素鋼線についての調査結果の一例を述べる。

欠陥の程度が比較的小さい場合には鋼線の引張り強さには何ら影響しないが引張り破面は正常な絞り切れ状のカップ・アンド・コーンとならずに伸び, 絞りが低下する。欠陥の程度が大きくなるにつれて絞りの小さい典型的なカッピー破面となり, 靱性だけでなく強度低下をもたらす。さらに著しい場合には伸線やより線の工程で断線する。

Table 4. Cuppy-like fracture on tensile test of PC wire.

Billet	No. of charge	Magnetic flux (G)	Defect (%)
Conventional	52	0, 0	62/2995=2.1
Stirring one strand	30	0, 240	29/1785=1.6
〃	27	0, 290	20/1660=1.2
Stirring both strands	16	290, 290	6/ 791=0.76



Photo. 5. Cuppy-like fracture of PC wire of 7 mm in diameter.

Table 4 に次の工程で製造された PC 鋼線の引張試験におけるカッピ状破面 (Photo. 5) の発生率におよぼす攪拌の影響を示す。

C·C (113φ) → 圧延 (12.3φ) → パテンティン
グ → 伸線 (7.0φ)

この表から電磁攪拌は鋼線の引張り特性の改善に有効であることがわかる。

4. 結 言

高炭素鋼連铸ビレットの中心偏析の軽減化を目的として、2 次冷却帯において 2 極回転磁界により鑄片の液芯を攪拌しその評価を行なった。

(1) 鑄片内部は攪拌により均質な等軸晶とすることができる。

(2) 中心偏析の定量的評価方法として中心部を鑄片長さ方向に多数分析し、その平均値と標準偏析を使用する方法を提案した。

(3) 上記評価方法によると電磁攪拌は、鑄込温度の高い場合に偏析に対して効果があることが示された。

(4) 攪拌によつて生じた白色帯は最終製品まで残存するが品質上問題にはならない。

(5) 中心偏析に大きく関係する鋼線のカッピ状破断率は攪拌によつて大幅に低下した。

文 献

- 1) 特許公告：昭 33-2768
- 2) D. P. B. 902434
- 3) D. P. B. 911425
- 4) W. POPPMFIER et al.: J. Metals, (1966) 10, p. 1109
- 5) ソ連における連続鑄造第 3 巻 [日ソ通信社] p. 34
- 6) 鑄造技術講座 10, 特殊鑄造法, p. 237, [日刊工業]
- 7) 森, 田中, 佐藤, 平居: 鉄と鋼, 57(1971), p. 263
- 8) 平居, 金丸, 森: 鉄と鋼, 52(1969), S. 85
- 9) 高石, 小舞, 野呂, 秋田: 鉄と鋼, 60(1974) 7, p. 915
- 10) A. P. AKIMENKO: 回転磁場内の連続鑄造, (1971), p. 147 [冶金出版所, モスクワ]