

技術報告

鑄片最終凝固位置近傍の電磁攪拌効果

水上 秀昭*・小松 政美*・北川 融*・川上 公成*²

Effect of Electromagnetic Stirring at the Final Stage of Solidification of Continuously Cast Strand

Hideaki MIZUKAMI, Masami KOMATSU, Toru KITAGAWA, and Kiminari KAWAKAMI

Synopsis :

It is commonly observed that severe V-channel segregates are associated with the equiaxed zone in the central region of a strand. This type of segregation may deteriorate the product qualities especially for sour gas service. The modification of V-segregates is found to be attained by electromagnetic stirring at the final stage of solidification. The laboratory scale stirring experiments have been carried out in order to eliminate V-segregation and the following results have been obtained.

- 1) V-segregation streaks can be eliminated by linear or rotary type stirrer at the final stage of solidification.
- 2) The upward flow of molten steel at the solidification front which may prevent the inter-dendritic liquid flow toward the bottom is effective.
- 3) In the case of stirring by rotary type stirrer, adequate amount of fine equiaxed crystals is necessary. Alternating stirring at the final stage of solidification may prevent coagulation of equiaxed crystals and modify the packing of them.
- 4) It was found that only weak stirring is enough.
- 5) It is important to time the stirring to the progress of solidification. Optimum stirring period should be aimed at right after the precipitation of crystals, fraction of solid equals to 0.1 at the center of a strand.

1. 緒 言

連続鑄造において、鑄片中心部の等軸晶を増加させ、内質の向上を計るため、鑄型内や二次冷却帯上部における未凝固溶鋼の電磁攪拌技術が適用されている^{1)~4)}。

一般に鑄型内や二次冷却帯における攪拌により、鑄片中心部の等軸晶は増加し中心偏析、センターポロシティは大幅に改善される。しかしながら、最終凝固部に十分な量の等軸晶領域を生成せしめると、逆に凝固の最終段階での収縮に伴う下方への濃化溶鋼の吸引現象によりV状のストリーク(V偏析)が形成され、これが高級鋼製造上の困難な問題となり連鑄適用鋼種の拡大を阻害している。

最終凝固位置近傍で等軸晶領域を攪拌することは等軸晶の充填に効果がありV偏析の生成防止にもつながると思われ、最終凝固部の等軸晶領域を攪拌する電磁攪拌方法について実験室的検討を行つたので報告する。

2. 実験方法

最終凝固部に十分な量の等軸晶を有するブルームまた

はピレットの軸心近傍の凝固をシミュレートするため、真空溶解した 250 kg の溶鋼を 150 mm ϕ 、高さ 1 m の耐火物製の鑄型に鑄造し、中心部を等軸晶凝固させた。実験に供した溶鋼の組成を Table 1 に、および実験装置の概略を Fig. 1 に示した。

攪拌方法の検討を行うため、Table 2 に仕様を示したリニア型あるいは旋回型の攪拌コイルを鑄型の高さ方向の中心に設置した。リニア型攪拌コイルを用いた攪拌実験では 1 対のコイルを鑄型の 4 面のうちの 2 面に相対して設置している。この場合、コイルを設置してある面の凝固界面上昇流を与えた場合には、他の 2 面には下降流が発生することを水銀モデル実験により確認している。

Table 3, 4 に示す攪拌条件の下で実験を行い、鑄片のマクロ組織、成分偏析等を調査した。Table 中の D_s は固相率 (f_s) が 0.3 に相当する凝固界面の攪拌時における表層からの距離である。 $D_s=50$ mm は鋼塊中心で固相が晶出し始める時期に、また $D_s=35$ mm は少なくとも 40 mm の完全液相領域が中心部に存在する時期に相当することを予備実験により確認している。また最終

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 6 月 29 日受付 (Received June, 29, 1983)

* 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku 210)

*² 日本鋼管(株)技術研究所 工博 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K.)

Table 1. Chemical composition of steel.

| %C | %Si | %Mn | %P | %S | sol Al% |
|------|------|------|-------|-------|---------|
| 0.15 | 0.20 | 0.70 | 0.015 | 0.015 | 0.030 |
| 0.45 | 0.20 | 1.05 | 0.015 | 0.015 | 0.030 |

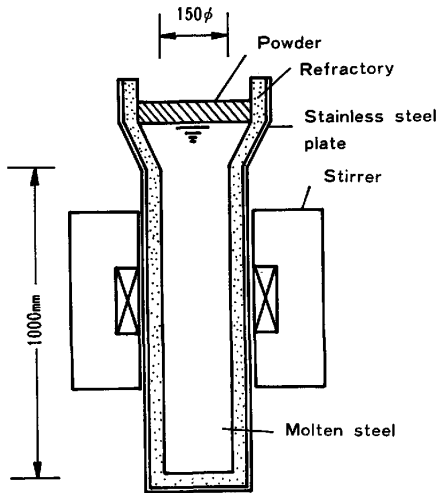


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 2. Specifications of stirrer.

| Type | Linear | Rotary |
|------------------|-----------------|---------------|
| No. of phases | 3 | 3 |
| No. of poles | 2 | 2 |
| Frequency | 50 Hz | 50 Hz |
| Electric current | Max. 800 A | Max. 1 700 A |
| Capacity | 100 kVA | 150 kVA |
| Core size | 165 mm × 575 mm | 300φ, 150 mmH |

Table 3. Stirring conditions by linear type stirrer.

| Condition | Stirring direction | Stirring intensity | Stirring pattern |
|-----------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|
| A | without stirring | | |
| B | ↑ ↑ | 700 A [※] | 1 min continuous at $D_s = 50$ mm |
| C | ↓ ↑ | 700 A | |
| D | ↑ ↑ | 400 A | 10 s interval at $D_s = 50$ mm |
| F | ↓ ↓ | 700 A | |
| E | ↑ ↑ | 700 A | 1 min continuous at $D_s = 35$ mm |

※ $U_{Fe} \approx 10$ cm/s

Table 4. Stirring conditions by rotary type stirrer.

| | |
|--------------------|--|
| Stirring intensity | $U_{Fe} = 10-20$ cm/s at final stage of solidification |
| Stirring timing | first stage of solidification (crystal multiplication) final stage of solidification, $D_s = 50$ mm and 35 mm (packing of equi-axed crystals) |
| Stirring pattern | continuous alternating |

凝固部に存在する等軸晶の粒径の影響を調査するため、铸型への注入終了と同時に溶鋼を攪拌し微細な等軸晶粒を多数生成せしめ凝固末期の攪拌と組み合わせた実験も

行つた。なお、攪拌時の溶鋼流速は後述する検討より、10~20 cm/s と推定された。

3. 実験結果

3.1 非攪拌材のマクロ組織

Photo. 1 に非攪拌材の縦断面のマクロ組織を示す。写真から明らかなように、十分な量の等軸晶が最終凝固部に生成しても中心部にはV偏析が生成し軸心部にはポロシティが残っている。また、表層から約 35 mm の位置でミクロ的に逆V偏析からV偏析に変化している。写真中にはその遷移位置を矢印で示してある。

3.2 リニア型攪拌コイルによる凝固末期攪拌

Photo. 2 にリニア型コイルを用いて凝固末期の等軸晶領域を垂直方向に攪拌した場合の代表的な条件におけるマクロ組織を示す。写真Cの右側半分のように凝固界面に上昇流が与えられるとV偏析は消滅し、逆に左側半分のように凝固界面に下降流が与えられるとV偏析は助長される。また、両側共に上昇流が与えられた場合の写真BではV偏析が消滅している。測温より推定される攪拌時の固液共存相内の固相率分布を Fig. 2 に示した。マクロ組織より観察される偏析線の生成位置、消滅位置をこの固相率分布と対比して図中斜線部で示した。凝固末期垂直上向攪拌により固液共存相内の f_s が 0.6 以上の部分で等軸晶粒間の濃化溶鋼の移動が抑制されていることが推定される。

以上より凝固界面に上昇流を与えることがV偏析の生成防止に有効であることがわかつた。また、攪拌時期が早すぎる条件Eの場合にはV偏析は残存していることを実験により確認しているの、凝固の末期、鋼塊の軸心で固相が晶出し始めた直後に攪拌することが必要であることがわかつた。なお、攪拌時間は本実験の場合には比較的短時間で十分であつた。Fig. 3 には非攪拌材と凝

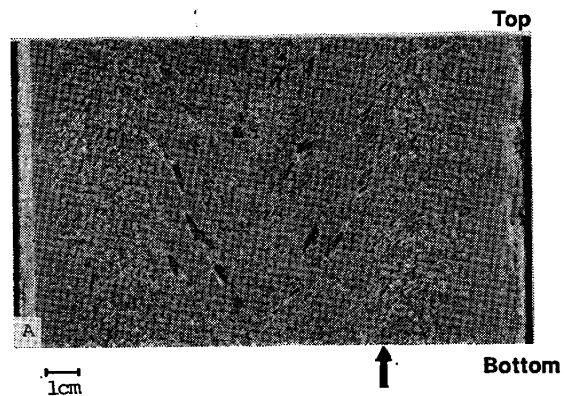


Photo. 1. Macro structure of longitudinal section of ingot without stirring.

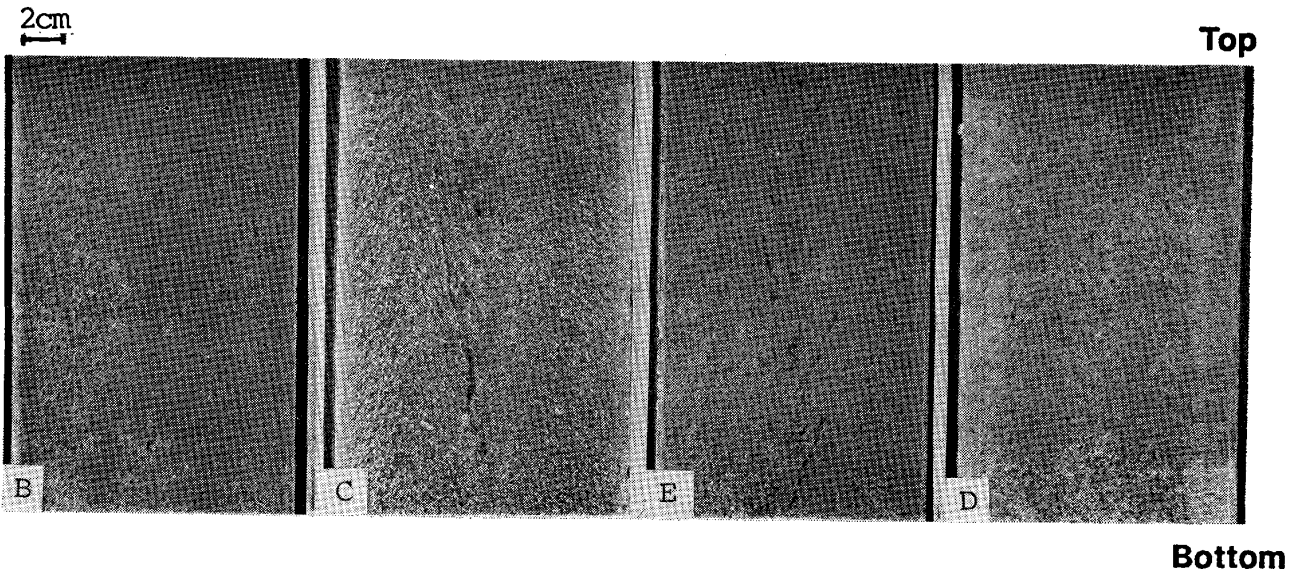
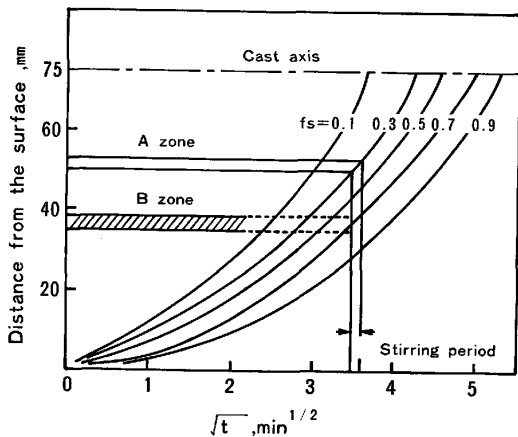


Photo. 2. Macro structure of longitudinal section of ingot at various stirring conditions (B, C, E and D correspond to those shown in Table 3).



A zone : Progress of solidification front during stirring period, which defined by the fraction of solid equal to 0.3.
 B zone : Segregation streaks located in the zone were controlled during stirring period.

Fig. 2. Solid fraction distribution during stirring period.

固末期に 1 min 連続して上向に攪拌した場合の鋼塊軸心部の炭素の偏析状況を示した。分析結果からは、マクロ組織で認められるような明瞭な改善効果は認められない。これは、本実験においては前述したようにコイルが設置されていない凝固界面には下降流が生じ、この部分で V 偏析の形成が助長されたためと思われる。実際 Photo. 2 (B) のマクロ面に垂直な面では V 偏析が助長されていることを確認している。

したがって、リア型攪拌コイルによる垂直方向攪拌を実操業に応用する場合、凝固界面の全面にわたって上昇流が与えられ、鋳片の軸心においてのみ下降流となることが望ましいが、このことは設備的には難しく局所的に凝固界面に下降流が生ずることは避けられない。この

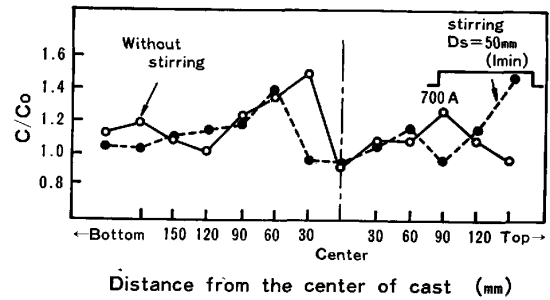


Fig. 3. Carbon distributions along center line in the ordinary and the stirred casts.

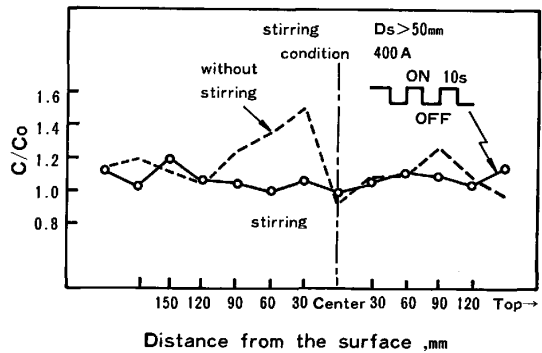


Fig. 4. Carbon distributions along center line in the ordinary and the intermittently stirred casts.

下降流が生ずる位置では Photo. 2 の写真 C から容易に推定されるように V 偏析が助長される。間けつ弱攪拌はこの好ましくない下降流を緩和する一つの方法と考えられる。凝固末期に 10 s 間隔で 10 s ずつ間けつで上向きに攪拌した場合のマクロ組織を Photo. 2-D に示した。Fig. 4 にはこの場合の軸心部の偏析状況を非攪拌材と比較して示した。このような凝固末期間けつ上向攪

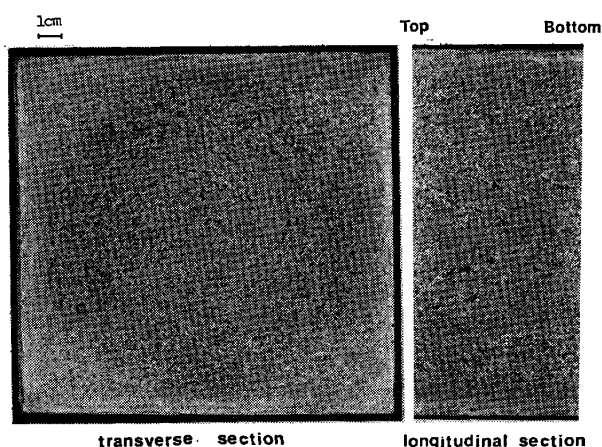


Photo. 3. Macro structure of the transverse and the longitudinal section of ingot with one way rotative stirring.

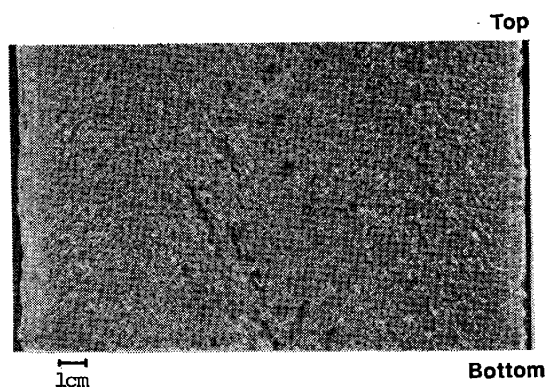


Photo. 4. Macro structure of longitudinal section of ingot with alternating rotative stirring at final stage of solidification.

拌によつてV偏析がなく、かつ軸心上の成分偏析のない均質な組織が得られることが明らかとなつた。

3.2 旋回型攪拌コイルによる凝固末期攪拌

Photo. 3 には凝固末期の等軸晶領域を水平一方向に連続して攪拌した場合の macros 組織を示した。コイル設置位置における横断面では渦巻状の偏析線が、また縦断面では短い点状のV偏析線が認められる。すなわちこの攪拌ではらせん状の濃厚偏析線が攪拌により形成されている⁹⁾。前述の Photo. 2 のリニア型攪拌コイルによる垂直方向相対攪拌の下降流側で偏析線が助長されたと同様に、一方向連続の攪拌では、攪拌により偏析線が形成され内質の改善は達成されない。

Photo. 4 には凝固末期の等軸晶領域を交番攪拌した時の macros 組織を示すが若干の効果が認められる程度である。凝固末期の等軸晶領域を攪拌して等軸晶粒の充填を達成するためには、最終凝固部に微細な等軸晶粒を多数生成せしめることが必要と推定されたため、次に鑄型への注入終了と同時に溶鋼を攪拌し、凝固末期攪拌を行

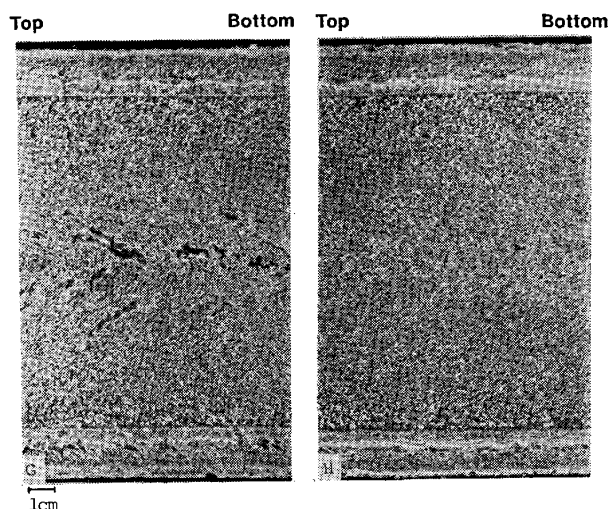


Photo. 5. Macro structures of longitudinal section of ingot with stirring at first stage (G) and stirring at both first stage and final stage (H).

わなかつた (G) と、さらに $D_s=50\text{ mm}$ すなわち鋼塊の中心で固相が晶出し始める時期に凝固末期攪拌を行つた (H) の macros 組織を比較して Photo. 5 に示した。初期攪拌により微細な等軸晶粒が多数生成したことが Photo. 1~4 と比較して明らかである。微細な等軸晶を多数生成せしめ、さらに凝固末期に水平方向の交番攪拌を行うことにより通常認められるV偏析、中心偏析は認められない。一方、凝固末期攪拌を行わない (G) ではV偏析が生成しており、中心部にポロソティも残っている。Fig. 5, 6 には (H) の場合の軸心方向、半径方向の成分の偏析状況を非攪拌の場合と比較して示した。以上より、微細な等軸晶粒を多数生成せしめて凝固末期攪拌を行うと偏析ポロソティのない内質のすぐれた鋼塊が得られることが明らかとなつた。

Photo. 6 には攪拌時期を $D_s=35\text{ mm}$ に、すなわち鋼塊中心部に十分な量の液相が存在する時期に早めた場合の macros 組織 (I) を $D_s=50\text{ mm}$ で攪拌した場合 (J) と比較して示した。垂直上向き攪拌の場合と同様、凝固末期攪拌は中心部に十分な量の液相が存在する時期は不適當である。攪拌が早すぎると攪拌終了後にV偏析が形成されると推定される。

Photo. 7 には凝固末期攪拌を行つたものと非攪拌材の軸心部のマイクロ組織を示した。明らかに微細な等軸晶を多数生成せしめて凝固末期攪拌を行つた (K) はマイクロ偏析が分散して1個の偏析粒も小さいが、非攪拌 (L) の方は大きな偏析粒が島状に存在する。この偏析粒のりんの偏析度を XMA により求めて Fig. 7 に示した。図中には実際のスラブ連鑄における軸心近傍の偏析粒の大きさと偏析比の関係も同時に示したが、凝固末期攪拌

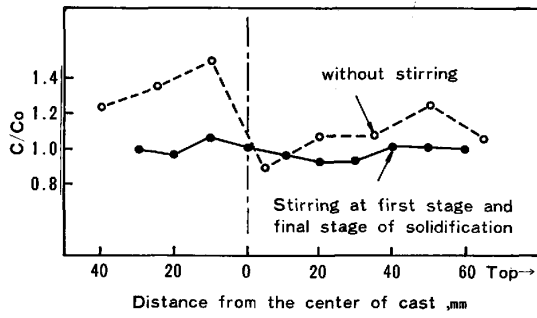


Fig. 5. Carbon distributions along center line in the ordinary and stirred casts.

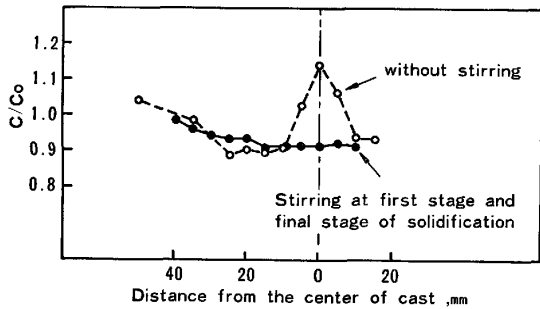


Fig. 6. Carbon distributions along the horizontal direction at the center portion in the ordinary and the stirred casts.

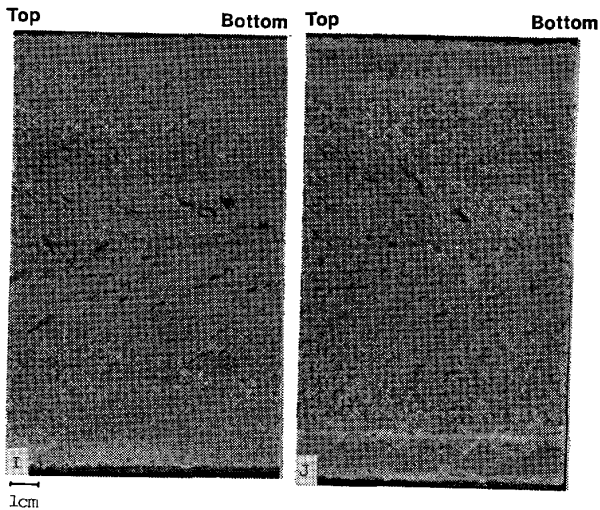


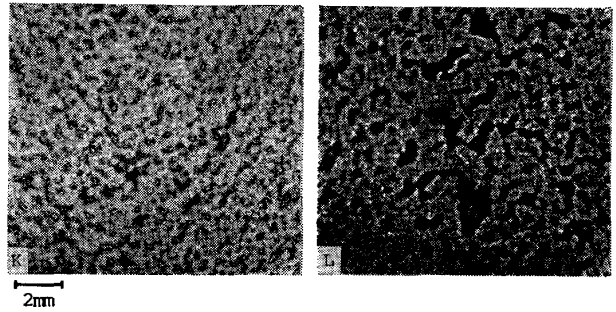
Photo. 6. Macro structures of longitudinal section of ingot with stirring in the earlier period of final stage (I) and stirring in the optimum period (J).

により偏析粒，偏析比共に小さくなつており，ミクロ的な分析からも凝固末期攪拌の効果が認められた。

4. 考 察

4.1 V偏析の消滅機構

等軸晶凝固する凝固の最終段階では，凝固の収縮に伴う下方への濃化溶鋼の吸引^{6)~9)}によりV偏析の生成は避



K : Alternating rotative stirring, L : without stirring

Photo. 7. Micro structures of ingot in the central zone.

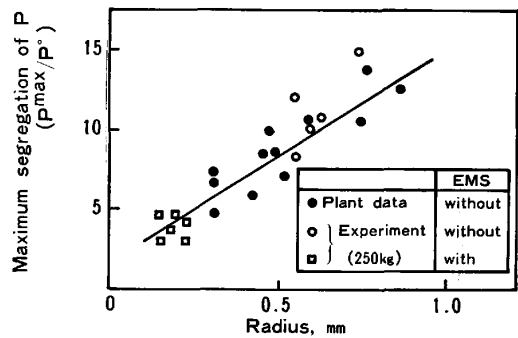


Fig. 7. Relation between particle size and maximum segregation ratio of phosphorus.

けられない。すなわち，凝固の進行に伴う下方への凝固収縮に追従できなくなつた等軸晶粒（固体）のネットワークのすきまを等軸晶粒間の濃化溶鋼（液体）が優先的に移動するためにV偏析が形成されると考えられる。

FLEMINGS ら¹⁰⁾は凝固の最終段階における固-液共存相内の濃化溶鋼の流動に関して詳細な解析を行い，固-液共存相内で固体のネットワーク間を濃化溶鋼が鋼塊の内側へ，すなわち高固相率側から低固相率側へ向かつて下方へ移動した場合，局所的に再溶解現象が生じV偏析が形成されると報告している。

また，浅井ら¹¹⁾は低温模型実験により等軸晶領域における“すべり現象”がV偏析生成のきっかけとなると報告している。このような“すべり”が起こると固-液共存相内の濃化溶鋼はこの“すべり面”に沿つて優先的に移動するであろう。

以上のことから，V偏析の発生を防止するには以下の2通りの方法が考えられる。

- 1) 凝固収縮に追従できなくなつた等軸晶粒(固体)間を濃化溶鋼(液体)が優先的に移動することを妨げる。
- 2) 濃化溶鋼(液体)と等軸晶粒(固体)が凝固の収縮に追従して同時に移動可能な状態とする。

Fig. 8 にはリニア型攪拌コイルを用いて凝固界面に垂直方向の攪拌を与えた場合のV偏析の生成パターンに

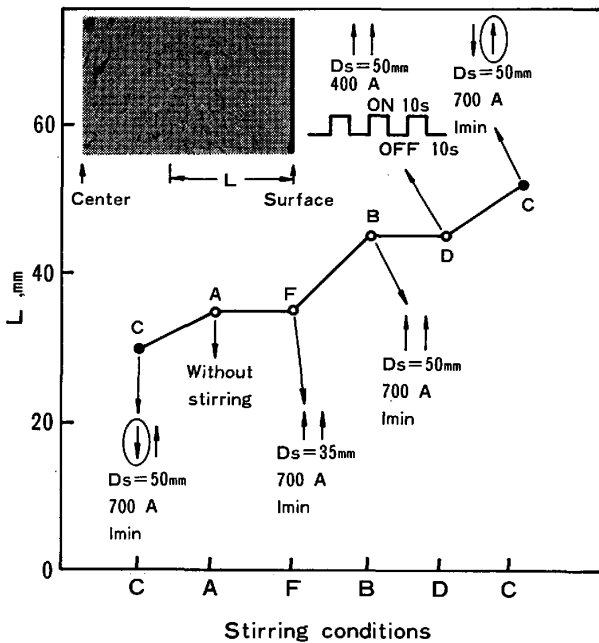


Fig. 8. Effects of stirring conditions on the microscopic V-segregation pattern.

及ぼす攪拌方法の影響を示した。濃化溶鋼の下方へのミクロ的な移動が始まる位置で比較した。図中・、で示したものは相対攪拌の下降流側と上昇流側を示している。図より濃化溶鋼の下方への移動は上向き攪拌の強度を上げるほど凝固の最終段階まで抑制されている。また、逆に下方への流動を与えた場合には、より早い時期からミクロ的な流動が起こっている。以上より、凝固界面の流動により、固-液共存相内の濃化溶鋼の移動を制御することが可能であり、今回効果のあつた凝固界面の垂直上向き攪拌においては濃化溶鋼の下方への優先移動が妨げられたため、すなわち前述の(1)の理由によりV偏析が防止されたと考えられる。なお、 $D_s=50\text{ mm}$ で攪拌した時に表層から約 35 mm の位置の粒間の濃化溶鋼の移動が妨げられており、この位置が攪拌時には固相率が 0.6 以上であると考えられることからV偏析形成開始時期より早い時期の攪拌は効果がないと思われる。実際 $D_s=35\text{ mm}$ で攪拌した場合 (F) には Fig. 8 に示した様にミクロ的な濃化溶鋼の流動開始時期は非攪拌の場合と変わっていない。

一方、旋回型攪拌コイルによる水平方向攪拌の場合には、前述した下方への濃化溶鋼の移動開始位置は非攪拌の場合と変わらない。すなわち、凝固収縮に伴い固-液共存相内の濃化溶鋼はミクロ的には非攪拌の場合と同様に下方へ移動している。この事実と、最終凝固部の等軸晶粒径は小さいことおよび交番攪拌がV偏析生成防止の必須条件であることを考えあわせると、旋回型攪拌コイ

ルによる水平方向の交番攪拌においては等軸晶粒同志の合体が防止され等軸晶粒の流動性が十分確保されたことにより、等軸晶粒 (固体) と粒間の残溶鋼 (液体) が凝固収縮に追従して同時に移動可能な状態となつたため、すなわち前述の(2)の理由によりV偏析の生成が防止されたと考えられる。

4.2 溶鋼流速および最適攪拌時期

凝固末期攪拌を実作業へ応用する場合、攪拌コイルのパワーの決定は重要な問題である。本実験における凝固末期攪拌の溶鋼流速を以下に推定する。

一般に旋回型コイル、リニア型攪拌コイルを用いる場合、得られる溶融金属の流速は(1)式で求められる¹²⁾¹³⁾。

$$U = K \cdot B \cdot R^n \cdot \sqrt{f} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} \cdot \mu^{-0.44} \dots \dots \dots (1)$$

- ここで U : 流速 [cm/s]
- K : コイルによる決まる定数
- B : 溶融金属中磁束密度 [Gauss]
- f : 周波数 [Hz]
- σ : 電気伝導度 [Ω /cm]
- ρ : 密度 [g/cm³]
- μ : 粘性 [c.p.]

(1)式中の R は旋回攪拌の場合にはバルク半径であり n は 1 である。またリニア型攪拌コイルによる垂直方向攪拌の場合の R はバルクの幅であり、 n は N-N 対向の対称型攪拌および相対型攪拌において 0.5 である。本実験で用いた攪拌コイルについて(1)式の定数 K を水銀モデル実験で求め、凝固末期の未凝固溶鋼 (等軸晶粒+残溶鋼) の平均的な粘性 (μ) を渋谷ら¹⁴⁾の測定結果より推定して溶鋼流速を計算すると、旋回型攪拌については $U=20\text{ cm/s}$ となる。交番攪拌では溶鋼の起動時間を考慮するとさらに小さくなる。一方リニア型攪拌については 10~15 cm/s 程度の流速となつた。

攪拌コイルのパワーの決定とともに、攪拌コイルの設置位置を決定することも重要である。本実験から、中心部に十分な量の液相が存在する時期は早すぎ、軸心部で固相が晶出し始める時期が適当であることが推定された。

実作業においては、鑄造方向の固-液共存相が長いとか、凝固収縮量が本実験とは異なるなど未知の部分が多いが、今回得られた攪拌推力および最適攪拌時期に関する知見は実作業への応用に際しての有益な基礎データである。

5. 結 論

連鑄々片の内質の向上の目的で、最終凝固部の等軸晶

領域を攪拌する電磁攪拌方法について実験室的検討を行い以下のことがわかった。

(1) 等軸晶凝固する最終凝固部の凝固界面に上昇流を与えることにより固液共存相内の濃化溶鋼の下方への優先移動を妨げ、V偏析，中心偏析，ポロシティのない内質の優れた鋼塊が得られる。

(2) 最終凝固部に微細な等軸晶粒を多数生成せしめ，さらに水平方向の交番攪拌を与えることにより等軸晶粒同志の合体を防ぎ，流動性が確保され，その結果V偏析，中心偏析，ポロシティのない内質の優れた鋼塊が得られる。

(3) 凝固末期の必要攪拌推力は，流速換算で10～20 cm/s の弱い攪拌で十分と推定された。

(4) 最適攪拌時期は鋼塊の軸心部で固相が晶出し始める時期と推定された。

文 献

- 1) 川上公成，細田義郎，伊藤雅治：学振 19 委-No. 9629 (昭和48年 9 月)
- 2) R. ALBERNY, L. ANGEL, J. P. BIRAT, J. CHONE, R. GOETZINGER, E. GRETHEN, and N. KAELL: International Iron and Steel Congress, Chicago (1978) Apr.
- 3) 岩田 齊，山田勝彦，藤田照夫，林 享三：鉄と鋼，61 (1975)，p. 2972
- 4) 森 隆資，綾田研三：神戸製鋼技報，29 (1978) 3，p. 16
- 5) 山田勝彦，多田英昭，藤田照夫：鉄と鋼，65 (1979)，S 700
- 6) Report on Heterogeneity of Steel Ingots: JISI, 113 (1926)，p. 39
- 7) 蒔田宗次：鉄と鋼，13 (1927)，p. 1001
- 8) A. HULTGREN: JISI, 120 (1929)，p. 69
- 9) 鈴木是明，宮本剛汎：鉄と鋼，59 (1973)，p. 431
- 10) M. C. FLEMINGS and R. MEHRABIAN: ASM Seminar on Solidification, Philadelphia (1969) Oct.
- 11) 井上 肇，浅井滋生，鞭 巖：鉄と鋼，67 (1981)，S 260
- 12) 水上秀昭，小松政美，川上公成：鉄と鋼，66 (1980)，S 800
- 13) 水上秀昭，小松政美，北川 融，川上公成：鉄と鋼，68 (1982)，S 254
- 14) 渋谷明彦，有原和彦，中村 泰：鉄と鋼，66 (1980)，p. 1550