

討15

連铸スラブのセミマクロ偏析とその低減技術

日本鋼管(株) 技術研究所 ○土田 裕, 中田 正之, 菅原 功夫
 福山研究所 宮原 忍, 工 博 村上 勝彦
 京浜製鉄所 田口喜代美

1. 緒 言

連铸スラブの軸心部に存在する偏析は、圧延工程における冷却の過程で低温変態組織を生成し、鋼板の均質性を阻害する¹⁾²⁾ことが知られている。特に近年、耐水素誘起割れ鋼はじめ偏析に対して敏感な高グード鋼の需要が増加しており、従来は問題にならなかったセミマクロ偏析(小型の島状偏析)も重要な因子であることが明らかになってきた。一方、セミマクロ偏析は、凝固末期のスラブ軸心部において、高溶質濃度の溶鋼が凝固収縮やバルジングに伴って流動、集積して形成されたものと考えられるが、その様子や、具体的な偏析の低減対策などに関する報告例は少なく^{3)~6)}、不明な点が多い。

本報告では、通常のスラブ铸片に観察されるセミマクロ偏析の実態について述べるとともに、铸片に圧下を加えて凝固末期の流動を抑制しつつ铸造する方法(軽圧下铸造法⁷⁾)による偏析低減効果につき言及する。さらに、ピン打込テストを実施し、トレーサーの流動軌跡から、偏析の生成におよぼす溶鋼流動の影響についても検討を加えた。なお、テストには主に扇島161号連铸機を使用した。

2. 供試材および調査方法

2.1 非軽圧下铸造铸片

比水量 $1.4\text{ l/kg}\cdot\text{steel}$ で铸造した $40\sim 60\text{ kg/ml}$ 級鋼(Ca処理鋼)の铸片軸心部近傍から、横断面または縦断面の試片を採取し、凝固組織と偏析を顕出した。その後、ボイドの少ない偏析粒を選び EPMA(ビーム径 $50\mu\phi$)にて濃度を分析するとともに、それと対応するセミマクロ偏析粒の断面積を求め、両者の関係を整理した。

2.2 軽圧下铸造铸片

主に铸造の温度と速度を変え、 $40\sim 60\text{ kg/ml}$ 級鋼(一部Ca処理鋼)を軽圧下铸造した。この際、高温铸造材の一部では、比水量を変え軽圧下ゾーン内でFeSを封入したCr-Mo系鋼製ピンを打込んだ。これら铸片から横断面の試片を採取後、中心偏析面積率やセミマクロ偏析粒の断面積分布を測定した。また、ピンを打込んだ铸片からは縦断面の試片を採取し、トレーサーの流動状況を観察、調査した。

3. 調査結果および考察

3.1 非軽圧下铸造铸片におけるセミマクロ偏析の実態

3.1.1 偏析の形態におよぼす铸造温度と凝固組織の影響

高温、および低温で铸造した铸片横断面のマクロ組織例を Photo.1 に、軸心近傍の組織を拡大観察した例を Photo. 2 に示した。高温铸造材では、上面側の柱状晶と下面側のデンドライト状等軸晶に囲まれた状態で、ほぼ独立してセミマクロ偏析が存在し、それがいわゆる中心偏析のパターンを構成している。一方、低温铸造材では、いわゆる中心偏析は認められないが、軸心近傍の粒状等軸晶帯の中にはマイクロ偏析と、V偏析を形成する大きなセミマクロ偏析粒が分散している。また、ナイトル液で腐食後に拡大撮影した例を Fig. 1 中の下段の写真に示したが、これらセミマクロ偏析粒内には、周囲に比べてかなり微細な結晶が観察されると

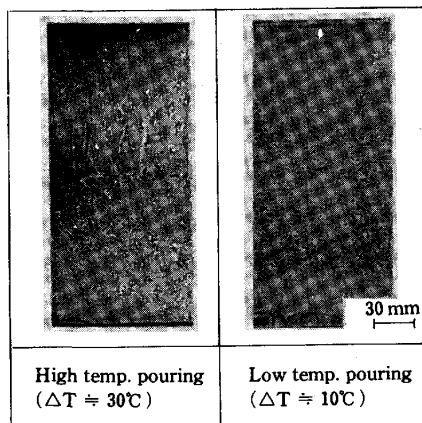


Photo. 1 Macro structure and centerline segregation in c.c slabs.

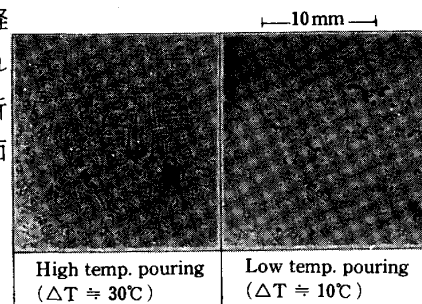


Photo. 2 Solidification structure and semi-macro-segregation at center region of C.C slabs (Etched by Stead's reagent)

いう特徴も有する。このように、鑄造温度や凝固組織によってやや形態は異なるが、いずれの場合にもセミマクロ偏析は存在する。

3・1・2 ミクロ、およびセミマクロ偏析の成分濃度

軸心部近傍のミクロ偏析とセミマクロ偏析のP, Mn濃度をEPMAにて線分析した。ここでミクロ偏析として、高温鑄造材では柱状晶帯のデンドライト二次アーム間、低温鑄造材では軸心付近、および流動の影響を受けていない粒状等軸晶間を選んだ。偏析部の濃度変化と組織の例をFig.1に、同様にして得た高温および低温鑄造材のPとMnの偏析度の関係をFig.2に示す。これらの図からわかるように、ミクロ偏析に比し、偏析の程度やその巾はセミマクロ偏析においてはるかに大きい。例えば偏析度の最大値についてみると、前者では $P/P^0 \approx 4.5$, $Mn/Mn^0 \approx 1.6$ に対し、後者では $P/P^0 \approx 13$, $Mn/Mn^0 \approx 2.1$ となっている。ただし、ミクロ偏析相互間、あるいはセミマクロ偏析相互間の偏析度は、鑄造温度や凝固組織により差がない。

一方、Fig.2に示したように、これらの偏析傾向はいずれもミクロ的な液相の濃縮式(1)⁸⁾⁹⁾を変形して得られた(2)式で整理できる。

$$C_L/C_0 = (1 - f_s)^{k_0} \dots (1)$$

$$(C_L/C_0)_{Mn} = (C_L/C_0)_P^{0.25} \dots (2)$$

[C_L/C_0] : 液相の偏析度 [f_s] : 固相率

[k_0] : 平衡分配係数 ($k_0^P = 0.2^{10}$), $k_0^{Mn} = 0.8^{10}$)

このようなことから、両偏析の間には何らかの関連を有するものと推察される。すなわち、セミマクロ偏析は、ミクロ的に偏析していた液相が流動~集積後、再凝固して形成されたことを意味していると考えられる。

3・1・3 断面積と偏析度の関係

EPMAで分析したセミマクロ偏析粒をステッド氏液にて腐食後拡大写真を撮影した。Photo.3に一例を示すように、偏析粒はいずれも複雑な形状をしているが、高温鑄造材ではやや等方的であるのに対し、低温鑄造材では鑄造方向に細長く伸びているのが特徴である。また、線分析した際の濃度分布は、顕出された偏析粒の黒色部を境に急に変化することを確認している。



Photo. 3 Examples of semi-microscopic segregation measured cross-sectional area. (Etched by Stead's reagent)

Fig.4に、写真から測定した偏析粒の断面積と、粒内におけるPの最大偏析度の関係を示す。粒の断面積が増大すると、それに伴って偏析度は大きくなり、高温鑄造材、低温鑄造材ともに同様の傾向を有する。ただし、液相の流動し得る限界固相率が凝固組織に依存するためか、粒状等軸晶からなる低温鑄造材には小断面積でもきわめて偏析度の高い粒がある。上述のように、通常の鑄片には粒径に対応して

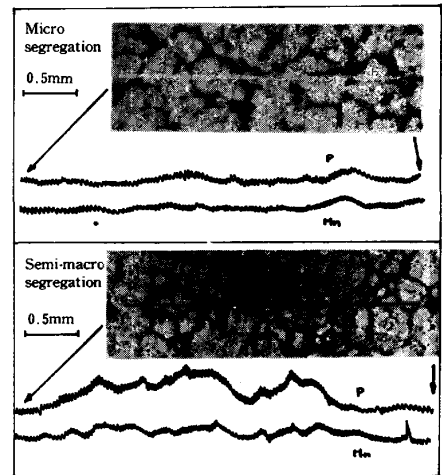


Fig. 1 Examples of segregation and line scanning by EPMA. (Case for low temp. pouring)

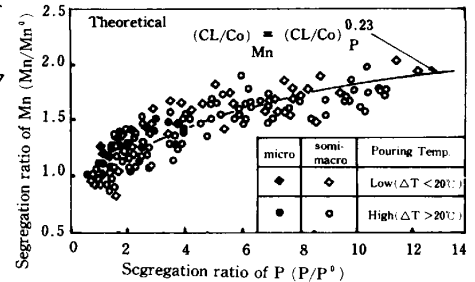


Fig. 2 Solute concentration of micro and semi-macroscopic segregation analysed by EPMA.

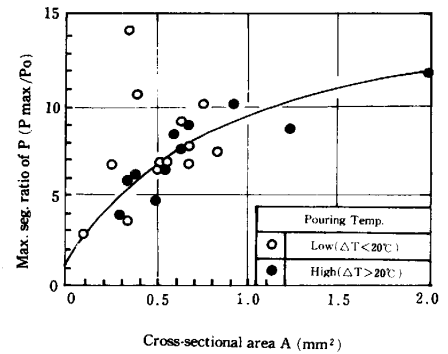


Fig. 4 Maximum segregation ratio dependence on cross-sectional area of semi-macroscopic segregation. (Case for Phosphorous)

成分濃度の変わるセミマクロ偏析が必ず存在する。従って、鑄片の均質性を向上させるためには、セミマクロ偏析の粒径を小さくすることが重要であり、次項では軽圧下鑄造法の有効性について述べる。

3・2 軽圧下鑄造法による偏析低減効果

3・2・1 軽圧下ゾーン内の固液共存相位置と鑄造条件

二次冷却帯のスプレー強度と鑄造速度に依存して固液共存相の位置が移動する様子を伝熱計算で求めた。比水量が $15 \text{ l/kg} \cdot \text{steel}$ の例を Fig.5 に示す。この場合、鑄造速度が $0.85 \sim 0.95 \text{ m/min}$ の範囲において固液共存相の大部分は軽圧下を受け、しかもクレーター先端は約 4 m の軽圧下ゾーン内に納まる。また これ以外の鑄造速度では、鑄片の軽圧下が不十分となることがわかる。同様に、比水量の異なる場合にも、適正な鑄造速度の範囲がある。

3・2・2 軽圧下条件によるマクロ的偏析評点の変化

高温鑄造材では、軽圧下率（鑄造方向単位長さ当りの圧下量）の増大に伴って中心偏析の評点は改善され、 1 mm/m 付近で良好となるが、それより大きな圧下率でも顕著な差はなかった。そこで、圧

下率 = 1 mm/m 一定とし、総軽圧下量が $0 \sim 4 \text{ mm}$ になるような鑄造速度 $0.6 \sim 0.95 \text{ m/min}$ を設定した。塩酸マクロエッチにて得た鑄片横断面の中心偏析面積率の変化を Fig.6 に示すように、総軽圧下量が大きくなると偏析は改善され、総軽圧下量 = $3 \sim 4 \text{ mm}$ 付近でほぼ一定になる。また、同じ軽圧下条件では、低温鑄造材に比して高温鑄造材の偏析は改善されている。一方、Fig.7 には高温鑄造材の偏析状況を示したが、総軽圧下量を 3.3 mm 程度に保つことで鑄片巾方向の中心偏析面積率のばらつきは小さくなり、Fig.6

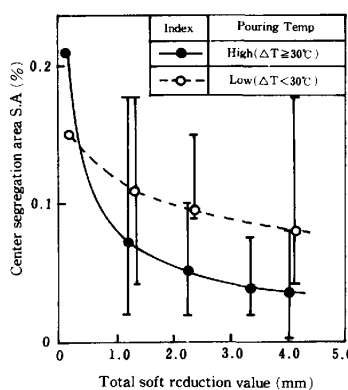


Fig. 6 Influence of soft reduction on the center segregation area. (soft reduction ratio = 1.0 mm/m) (casting speed = $0.6 \sim 0.95 \text{ m/min}$)

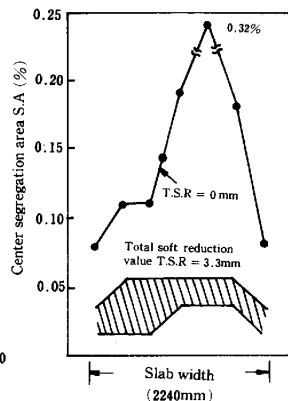


Fig. 7 Effect of soft reduction on the center segregation area in cross section.

下率 = 1 mm/m 一定とし、総軽圧下量が $0 \sim 4 \text{ mm}$ になるような鑄造速度 $0.6 \sim 0.95 \text{ m/min}$ を設定した。塩酸マクロエッチにて得た鑄片横断面の中心偏析面積率の変化を Fig.6 に示すように、総軽圧下量が大きくなると偏析は改善され、総軽圧下量 = $3 \sim 4 \text{ mm}$ 付近でほぼ一定になる。また、同じ軽圧下条件では、低温鑄造材に比して高温鑄造材の偏析は改善されている。一方、Fig.7 には高温鑄造材の偏析状況を示したが、総軽圧下量を 3.3 mm 程度に保つことで鑄片巾方向の中心偏析面積率のばらつきは小さくなり、Fig.6

3・2・3 中心偏析面積率とマクロ的偏析度との関係

鑄片厚み方向から 2 mm 毎の段削切粉を採取し、化学分析にて中心偏析部の濃度を求め、その推移を調査した。一例を Fig.8 に示すように、中心偏析面積率の低下に伴って Mn の最大偏析度は小さくなる。C, P についても同様だった。これは、後述のようなセミマクロ偏析の変化に起因していると考えられる。

3・2・4 セミマクロ偏析粒の大きさとの変化

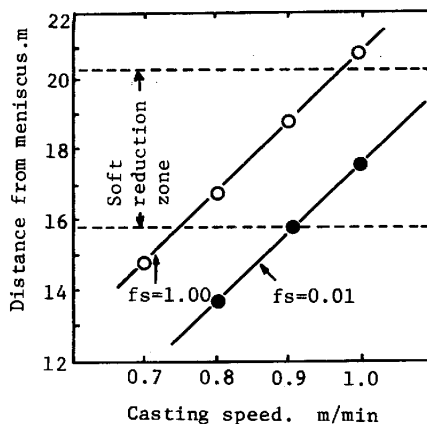


Fig. 5 Relation between distance from meniscus of crater end and casting speed. (Spray cooling intensity : $1.5 \text{ l/kg} \cdot \text{steel}$)

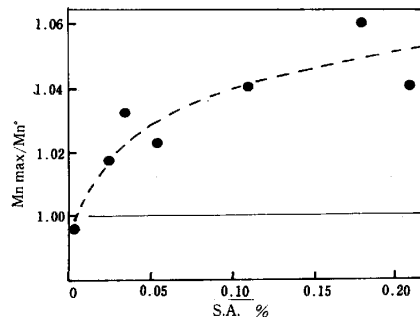


Fig. 8 Relation between center segregation area, S.A., and Mn content in center segregation.

総軽圧下量0~3.3mmで得た鋳片内セミマクロ偏析の拡大観察例を Photo.4 に、画像処理装置で測定した偏析粒の大きさ別個数の変化を Fig.9 に示す。セミマクロ偏析は、柱状晶とデンドライト状等軸晶で形成されるピラミッド状界面の頂点と谷の間に存在し、界面の整合性が向上して偏析粒の存在空隙が狭くなるに伴い、中心偏析面積率は低下する。すなわち、適切な条件下で軽圧下鋳造することにより、大断面積の偏析粒が減つて小径化するとともに、総個数も少なくなることがわかる。

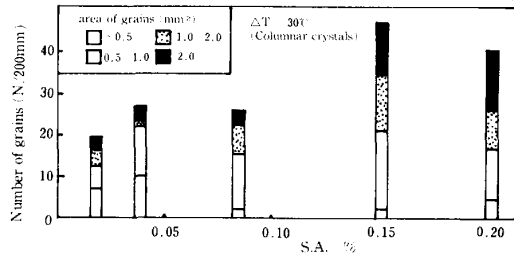


Fig. 9 Change of grain size and number of semi-macroscopic segregation with the center segregation area, S.A. (Measured by Image Analyser)

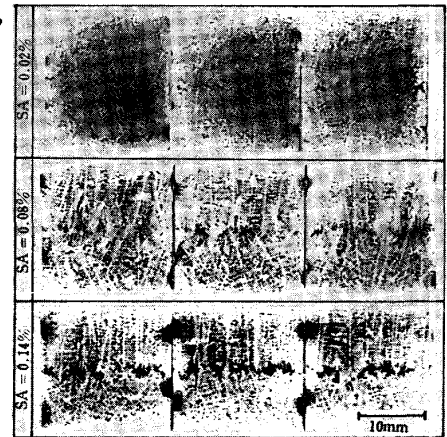


Photo. 4 Relation between the center segregation area, S.A. and semi-macroscopic segregation.

3. 3 凝固末期の溶鋼流動に関する検討

軽圧下率 = 0.95mm/m, 鋳造速度 = 0.85m/min で、比水量を 0.8~1.5 l/kg. steel に変えて鋳造した鋳片のサルファープリントを Photo. 5 (a)(b) に示す。弱冷却で、かつクレーター先端がわずかに軽圧下ゾーンを通過していた(a)の場合、鋳造のトップ側とボトム側のいずれにもトレーサの流動した形跡があり、広範囲に分散している。また、軸心には大きなセミマクロ偏析が多数存在する。これは主に、鋳片のロール間バルジングに伴ってボトム側へ流動した溶鋼が、その後ロールで圧下~矯正されて逆流するという現象がくり返えされて形成したものと考えられる。一方、3.2.1項で示したような、ほぼ十分な軽圧下条件下で鋳造した(b)の場合には、ボトム側の約30mm以内の領域にのみトレーサが明瞭に確認できる状態で分布し、それを除く部分には大きな偏析粒は認められない。これは、強冷却により鋳片のバルジングが少なかったことに加え、軽圧下鋳造することで凝固収縮に起因する大きな流動も抑制されたためと推察される。

4. 結 言

連鋳々片のセミマクロ偏析に注目して各種の調査、解析を実施し、凝固組織との関係や偏析粒の濃度など、その実態を述べた。また、鋳片を強冷却し、かつ適正な条件下で軽圧下鋳造することにより、バルジングや凝固収縮に起因する凝固末期の溶鋼流動をともに抑制できることを明らかにした。さらに、軽圧下鋳造により、セミマクロ偏析粒が小径化するとともに、個数も減少することを示した。

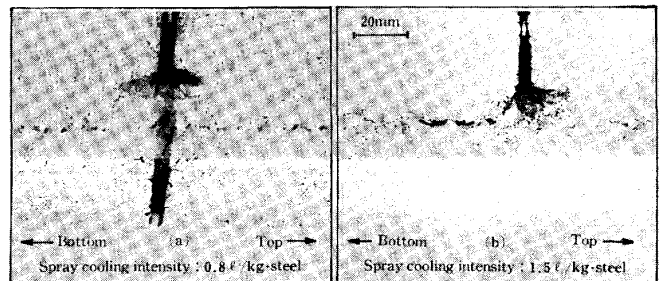


Photo. 5 Traveling of tracer, FeS, near the center of slabs. (Soft reduction ratio = 0.95 mm/m, Casting speed = 0.85 m/min)

参考文献

- 1)池田 昭夫, 他: 鉄と鋼, 68(1982)11, S1286
- 2)松本 和明, 他: 鉄と鋼, 68(1982)11, S1288
- 3)佐々木貫太郎, 他: 同上, 66(1980)1, p43
- 4)三隅 秀幸, 他: 同上, 67(1981)12, S844
- 5)土田 裕, 他: 同上, 68(1982)4, S219
- 6)中田 正之, 他: 同上, 68(1982)11, S871
- 7)楯 昌久, 他: 日本鋼管技報, 93(1982)3, p67
- 8)E. Sheil: Z. Metallk., 34(1942), p. 70
- 9)W. G. Pfann: Trans. AIME, 194(1952) p. 747
- 10)日本鉄鋼協会: [鉄の鋼の凝固] 付-2 (1977)