

討16

連続鑄造鑄片の粒状偏析

住友金属 鹿島製鉄所 市川 浩 ○川崎守夫 渡部忠男 豊田 守
中央技術研究所 杉谷泰夫

1. 緒言

連続鑄造鑄片の軸心部に見られる中心偏析を改善するために、今日までに各種の対策が講じられてきた。これまでの中心偏析改善の基本的な考え方は、凝固末期における濃化溶鋼をいかに動かさないように凝固させるかということである^{1)~4)}。このために、溶鋼静圧によるロール間のバルジングを防止する手段²⁾、凝固組織の等軸晶化、あるいは凝固収縮に見合う量だけ鑄片を圧下する方法³⁾等が採用され以前に比べて偏析はかなり改善されてきた。しかし、近年連鑄材の高級鋼への適用拡大につれて、耐ラメラティア性、耐サワー性等の観点から、従来それ程問題にならなかった小型の偏析（以下粒状偏析と呼ぶ）が重要視されつつある^{5)~8)}。そこで、この粒状偏析の実態を調査し、凝固組織および鑄造条件との関係を明らかにするとともに、生成機構についても若干の検討を行ったので報告する。

2. 調査方法

(1) 供試材の成分および鑄造条件

供試材の成分および鑄造条件をTable 1, Table 2に示す。鹿島製鉄所にて製造した40~60 Kg/m²鋼の中で、[C],[Mn],[P]の値の異なるものを選択し供試材とした。操業条件としては、タンディッシュ内溶鋼過熱度および電磁攪拌の有無等を変化させた。

(2) 調査方法

調査用試料は鑄片巾中央部で鑄造方向に平行な断面の厚み中央部および中央より10 mm離れたところより採取した。試料の大きさは10mm×10mmである。切り出した試料を飽和ピクリン酸で短時間エッチングを行い、偏析部を現出させた後調査に供した。調査はまず偏析粒の長径、短径の測定を行い、偏析粒の面積を求めた後軽く研磨し、エッチング模様を消去した後、E P M AによりMn, P, Siの線分析を行い、各成分の偏析状況や偏析度を求めた。なお、E P M Aのビーム径は5 μm, ビームの送り速度は100 μm/minである。

3. 調査結果

(1) 粒状偏析の実態

Photo. 1に、粒状偏析のエッチング後の現出状況を示す。マクロエッチングにより線状に観察される部分を拡大してみると、このような粒状の偏析が密集しているわけである。この部分の線分析結果の1例をFig. 1に示す。偏析部のほぼ中央部にピークを示す偏析形態を示し、MnおよびSiに比べてPの偏析が大きいことがわかる。他の偏析粒もほぼこれと同様な形態を示す。

(2) 粒状偏析粒内におけるMn, P, Siの関係

粒状の偏析部の任意の位置におけるMnとSiの偏析度の関係の1例をFig. 2に示す。MnとSiはほぼ同様な偏析度を示すことがわかった。他

Table 1 Chemical composition. (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Al	Ca
0.01	0.20	0.72	0.006	0.001	0.021	
∫	∫	∫	∫	∫	∫	∫
0.50	0.34	1.56	0.023	0.008	0.045	0.0040

Table 2 Casting condition.

Machine	Casting speed	Superheat in tundish	Slab size	Specific water	E. M. S
Concast	0.6 m/min	11 °C	250 (270) mm	2.0 t/kg	with
S-type	∫	∫	×	∫	∫
(12.5 mR)	0.9	40	1350~2200 mm	2.7	without

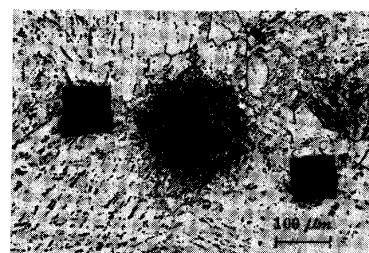


Photo. 1 Granular Segregation.

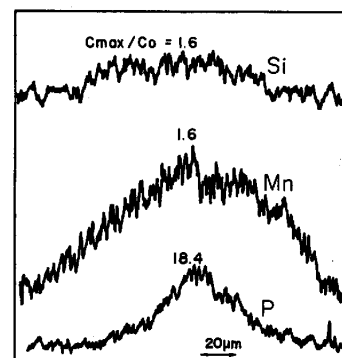


Fig. 1 Segregation of Si, Mn and P.

の偏析粒についても同様な傾向がみられた。

次にMnとPについても偏析内の任意の位置における偏析度を調査した。Fig. 3に結果を示すが、偏析粒の大きさが大巾に異なっているにもかかわらず、MnとPは次式に示すような関係にあることがわかった。

$$(Ci/Co)_{Mn} = (Ci/Co)_P^{0.23} \dots \dots \dots (1)$$

ただし Ci : 偏析内任意位置での溶質濃度
Co : 初期濃度 (レドール値)

(3) 偏析粒の大きさと最大偏析度の関係
粒状の偏析の長径と短径から求めた偏析

断面積とPの最大偏析度の関係をFig. 4に示す。面積が大きくなるにつれて高くなる。高温鑄造材と低温鑄造材では同じ傾向を示すが、低温鑄造材で面積が小さいものの中に異常に高い偏析度を有するものが存在している。これは凝固組織の違いにより生ずる凝固末期における液相の流動の難易性に起因するものであろう。同図には電磁攪拌適用材の結果も示しているが、非適用材に比べてかなり低い値を示す。これは攪拌により凝固組織が微細化され、偏析が分散したためと考えられる。しかし電攪を適用した低温鑄造材の中にも、非適用材と同様に高い偏析度を示すものが見られた。MnについてもPと同じ調査をしているが、Pとほぼ同じ傾向を示す。

(4) 位置と最大偏析度の関係

Fig. 5に鑄片厚み中心部と中心より10mm離れたところの偏析度の違いを示した。サンプル採取位置の違いによりMnとPの関係は異なる。これは、凝固組織あるいは凝固時期の違いによるものと考えられる。各位置におけるMnとPの関係を求めると次式のようなになる。

[中心部] $(C_{max}/Co)_{Mn} = (C_{max}/Co)_P^{0.23} \dots \dots (2)$ [中心より10mm] $(C_{max}/Co)_{Mn} = (C_{max}/Co)_P^{0.18} \dots (3)$

(5) Pの最大偏析度におよぼす溶鋼の[C]および[P]の影響

Pの最大偏析度におよぼす[C]の影響をFig. 6に、[P]の影響をFig. 7に示す。調査した[C]範囲0.01~0.50%では、低[C]にする程Pの偏析度は小さくなる。特に0.12%以下で

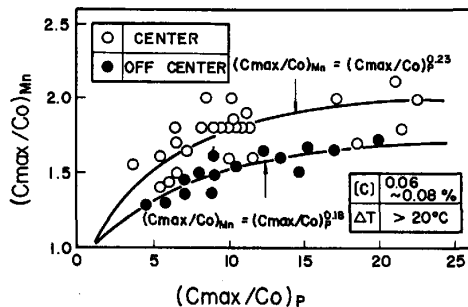


Fig. 5 Difference of P segregation ratio between center and off center (10 mm)

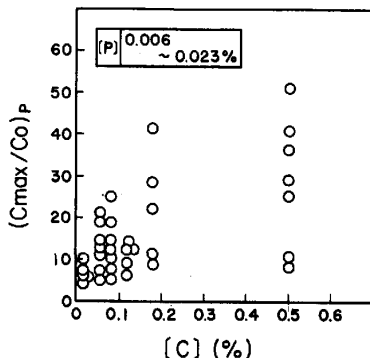


Fig. 6 Effect of [C] on maximum segregation ratio of P.

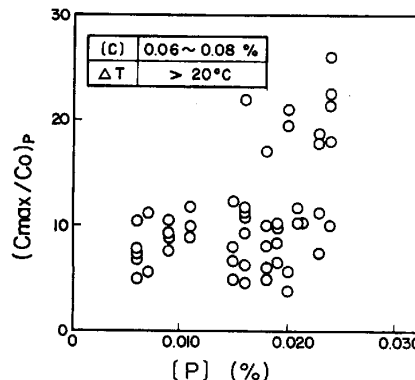


Fig. 7 Effect of [P] on maximum segregation ratio of P.

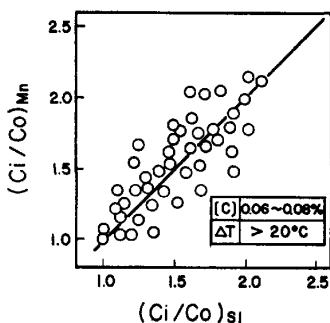


Fig. 2 Relation between segregation ratio of Si and Mn at various positions in granular segregation zone.

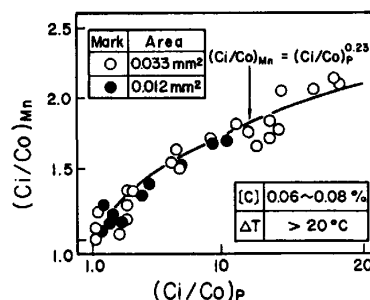


Fig. 3 Relation between segregation ratio of P and Mn at various positions in granular segregation zone.

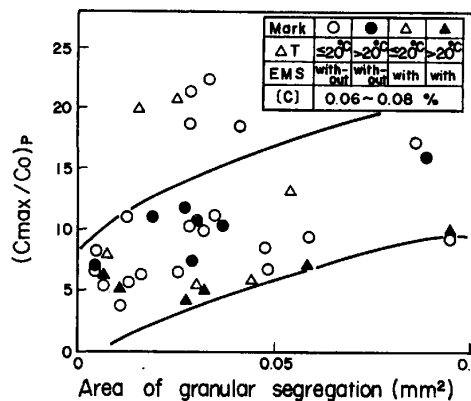


Fig. 4 Relation between maximum segregation ratio of P and area of granular segregation.

は20を越える高い偏析が非常に少なくなる。[P]に関しても低[P]にする程、Pの最大偏析度は小さくなる。[P]が0.010%程度になると最大偏析度も10前後とかなり低い値になることがわかった。

4. 考察

粒状偏析におよぼす各種要因の影響について以上述べてきた。ここでは、粒状偏析の生成機構を凝固理論と関連づけて明らかにする。

(1) 粒状偏析の生成時期(固相率)

粒状偏析について述べる前に、比較のためデンドライト樹間の偏析について述べる。デンドライト樹間の偏析に対して、次式で表わされる「液相での混合が完全、固相での拡散がないモデル」^{9)・10)}が適している。

$$C_s = k_0 \cdot C_0 \cdot (1 - f_s)^{k_0 - 1} \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 C_s : 固相の濃度, C_0 : 凝固開始前の初期

濃度, k_0 : 平衡分配係数, f_s : 固相率

$k_0=0.90$ として計算した結果を実測結果と比較してみると、Fig. 8に示すように両者はよく一致している。そこで粒状偏析に対してもこのモデルを適用することにした。

ところで、粒状偏析とデンドライト樹間の偏析を比較してみると、Fig. 9に示すように前者の方がかなり大きい値を示す。これは、樹間の濃化溶鋼が吸引され、局部的に集積した結果である。そこで、粒状偏析の生成に関する濃化溶鋼の流動開始時期(固相率)についてFig. 10に示す凝固モデルを用いて検討した。すなわち凝固末期になってバルク溶鋼がなくなり、遷移層のみになった時バルジング等により、固相率 f_1 以下の樹間の濃化溶鋼が流れ出し完全に混合するとする。図中斜線で示した領域の溶鋼が完全に混合した時の成分濃度 \bar{C}_L は次式で表わせる。

$$\bar{C}_L = C_0 \cdot \frac{2}{k_0 + 1} \cdot \frac{(1 - f_0)^{k_0 + 1} - (1 - f_1)^{k_0 + 1}}{(1 - f_0)^2 - (1 - f_1)^2} \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 f_0 : 凝固先端の固相率

粒状偏析近傍の平均成分濃度を線分析結果より算出し、(5)式を用いて f_1 を求めると

$$f_1 \approx 0.70 \dots\dots\dots(6)$$

となる。すなわち、粒状の偏析は固相率0.70以下の範囲に対応する樹間の濃化溶鋼が流れ出し集積したものと考えられる。

(2) 凝固過程と濃度変化

粒状偏析の濃度変化を偏析粒の大きさ別にFig. 11に示す。ピークのところを最終凝固位置とし、偏析粒を球と仮定して求めたものであるが、小さい偏析は比較的理論値と類似のパターンを示すのに対して、大きい偏析は理論値から離れ高濃度側に移る。これは偏析粒が大きくなるにつれて凝固が多次元、複雑な溶質の流れになるた

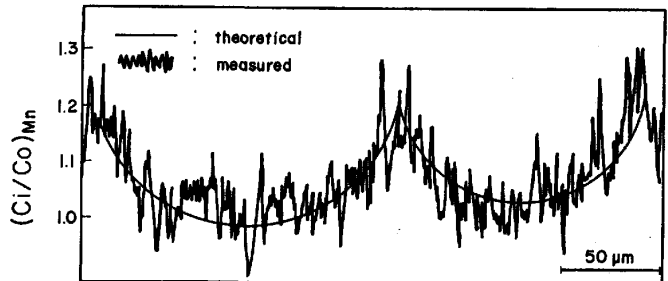


Fig. 8 Interdendritic segregation of Mn

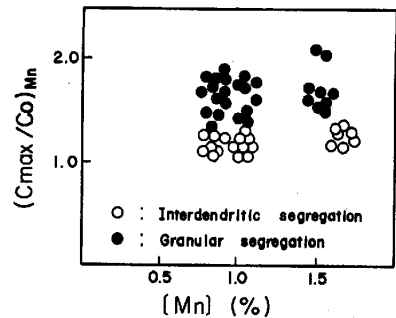


Fig. 9 Comparison between interdendritic segregation and granular segregation

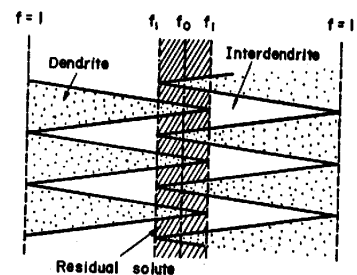
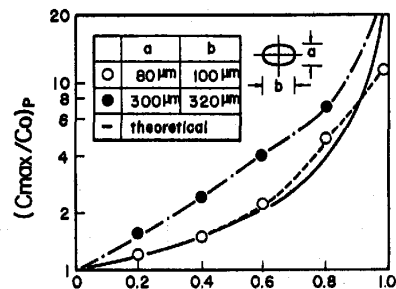


Fig. 10 Solidification model



Solidification ratio of granular segregation
Fig. 11 Segregation ratio change in granular segregation,

めと考えられる。

(3) 粒状偏析におよぼすテーパアライメントの影響

粒状偏析は前述したように最終凝固位置（固相率 0.7 以下）における溶鋼の流動排出に起因している。これはバルジングおよび凝固収縮によるものと考えられ、前者に対しては強冷却鋳造法、後者に対しては収縮量に見合量だけの圧下を施すテーパアライメント法を採用している。前者に関しては多くの報告²⁾があるので省略し、後者についてのみ述べる。Fig. 12 にテーパ量を種々変化させた時の粒状偏析の状況を示した。テーパ量を増すにつれて、低い偏析度を示す偏析粒は多くなるが、過度のテーパによりかえって少なくなることが判明し、適正テーパ量の選択が重要であることがわかった。なお電磁攪拌を適用した時の結果も同図に示しているが、等軸晶を増加させた鑄片については、非適用材より良好な傾向がみられた。

(4) 均熱拡散処理

鑄片内に生成した粒状偏析を軽減する方法の一つとして拡散処理法がある。Fig. 13 に 1300℃ で均熱拡散処理を行った時の粒状偏析の変化を示している。この方法により、かなり偏析が軽減するが、大きい偏析粒（300 μm 以上）は軽減程度が小さく、拡散処理のみでは困難である。偏析粒を微細化あるいは分散化する必要があると推察される。

5. 結 言

連鑄鑄片の中心偏析部およびその近傍における粒状偏析を EPMA で分析し、偏析の実態を明らかにするとともに、生成機構について検討した。結果をまとめると次のようになる。

- (1) Mn と Si は、粒状偏析のあらゆる位置でほぼ同じ偏析度を示すのに対して、P は高い値を示す。
- (2) Mn と P の濃度関係は Scheil の式で整理できる。偏析の程度は dendrite 樹間のマイクロ偏析よりはるかに大きい。
- (3) 最大偏析度は偏析粒が大きくなると増大する傾向を示すが、鋳造温度の影響は少ない。ただし、低温鋳造材の中に小型偏析粒にもかかわらずきわめて高い偏析度を示す粒も存在している。
- (4) P の最大偏析度におよぼす [C], [P] の影響は明白で、低 [C], 低 [P] 化する程小さくなる。
- (5) 粒状偏析は凝固末期に何らかの要因により、固相率 0.7 以下の dendrite 樹間の濃化溶鋼が吸引され、局部的に集積した結果生じたものと推察される。

〔参考文献〕

1) 熊井, 浅野, 大橋; 鉄と鋼, 60 (1974) 7, S156. 2) 橋尾, 川崎, 渡部他; 鉄と鋼, 66 (1980) 11, S 757.
 3) 中田, 土田, 村上他; 鉄と鋼, 68 (1982) 11, S871. 4) 佐々木, 杉谷, 石村; 鉄と鋼, 66 (1980) 1.
 5) 佐伯, 新美, 水上他; 鉄と鋼, 68 (1982) 11, S869. 6) 土田, 菅原, 宮原他; 鉄と鋼, 68 (1982) 7, S219.
 7) 北村, 宮村, 坂口他; 鉄と鋼, 68 (1982) 11, S868. 8) 三隅, 田中, 小椋他; 鉄と鋼, 67 (1981) 11, S844.
 9) E. Scheil; Z. Metallk. 34 (1942), P70. 10) W. G. Pfann; Trans. AIME, 194 (1952), P 747.

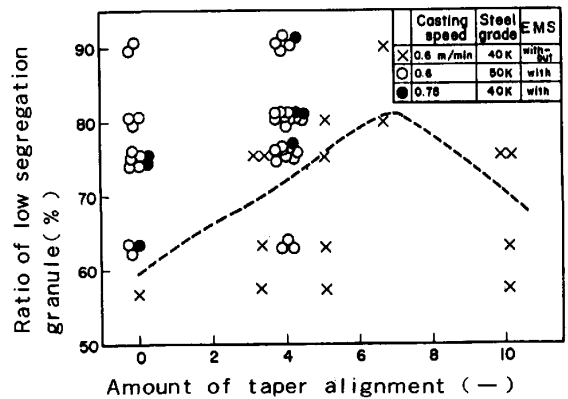


Fig. 12 Effect of amount of taper alignment on ratio of low segregation granule.

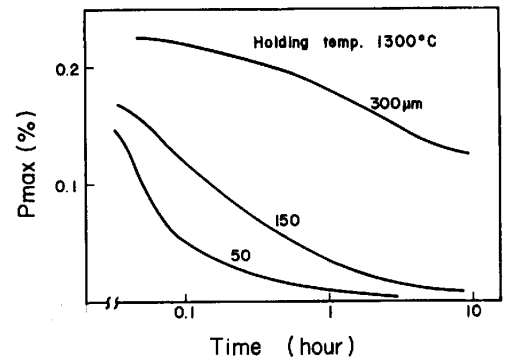


Fig. 13 Decrease of maximum P by holding at 1300°C.