

鍛造用鋼塊に生成する逆 V 偏析の  
発生状況と影響因子山田 人久\*・桜井 隆\*・竹之内朋夫\*<sup>2</sup>Appearance of "A" Segregation in Forging Ingots and Influencing  
Factors

Hitohisa YAMADA, Takashi SAKURAI and Tomoo TAKENOUCI

## Synopsis :

Since "A" segregation in forging ingots has adverse effects on the quality of products, it is important to determine quantitatively the number, the size, and the extent of segregation of "A" segregation in ingots. For this purpose eleven commercial ingots of different sizes and steel grades were examined. The results show that "A" segregation spots distribute in a region surrounded by two coaxial circles and that the peak of the number of spots is around the center of the region, in the cross section of ingots. The increase in the number from the outer circle toward the peak is determined by the size of the dendrite, and the decrease from the peak toward the inner circle is determined by the decrease in liquid fraction at the ingot center while it is solidifying. The size of the spots tends to increase with increasing the size of ingot and is proved to be dependent of the coarseness of the dendrites. Finally the enrichment of solute in "A" segregation is found to differ among elements and also with steel grades. It is proved that the enrichment is determined by the partition ratio of each alloying element and by the coarseness of dendritic structure.

Key words : macro-segregation ; segregated streak ; ingot making ; low-alloy steel ; dendrite arm spacing ; inverse-V segregation.

## 1. 緒 言

前報では発電機用材料などの品質や信頼性を向上させるため、鍛造用鋼塊内に生成して不均質性の原因となる逆 V 偏析を調査し、偏析の発生開始や消失する位置を規定する因子を検討するとともに、その発生領域を推定する方法を明らかにした<sup>1)</sup>。

一方、逆 V 偏析による製品品質への影響は偏析の発生量やスポットの大きさによっても変化し、偏析内の成分濃化程度も極めて重要な評価項目である。しかしながら、これらの点について詳細に調査研究した例はほとんどなく、鋼塊の大きさや成分系ごとに逆 V 偏析の領域を推定できても、偏析の発生量や成分の濃化程度が不明の場合には、鋼塊の品質を十分に比較評価できないものと考えられる。

そこで、本研究では前報で用いた大きさと成分系の異なる鍛造用鋼塊について、逆 V 偏析のスポット数や大きさを測定するとともに、偏析内の成分濃度を分析してそ

の生成状況を明らかにした。また、各調査項目ごとにその発生程度がいかなるものに影響されているのかを検討し、逆 V 偏析の生成程度を規定している主要な因子を明らかにした。

## 2. 実験方法

## 2.1 逆 V 偏析スポットの数と大きさの調査

調査に用いた鋼塊の化学成分を Table 1 に示すが、供試鋼塊は前報で用いた中から、75 t を除いた 11 本の鋼塊である。調査は鋼塊本体高さ方向の中央部、または押湯付け根部より 300 mm 本体側の位置を、横方向に切断した面で実施した。逆 V 偏析の観察は主にマクロ腐食組織によりおこない、比較的鮮明に現出したスポット状偏析の中から平均径が 3 mm をこえるものを逆 V 偏析と仮定して判定した。

この基準に従い調査面全域にわたり偏析スポット数を測定するとともに、鋼塊符号の 10 t, 90 t (A), 90 t (B) および 250 t については偏析の発生領域を径方向に 7 等

昭和 57 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 12 月 28 日受付 (Received Dec. 28, 1987)

\* (株)日本製鋼所室蘭研究所 (Muroran Research Center, The Japan Steel Works Ltd., 4 Chatsumachi Muroran 051)

\*<sup>2</sup> (株)日本製鋼所室蘭研究所 工博 (Muroran Research Center, The Japan Steel Works Ltd.)

Table 1. Chemical composition of investigated ingots.

Ingot (t)	Material	Chemical composition (wt%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
9	Cr-Mo	0.88	0.60	0.39	0.012	0.0008	0.19	2.86	0.21	
10	Cr-Mo	0.89	1.00	0.33	0.018	0.010	0.16	2.90	0.38	
25	Carbon steel	0.30	0.32	0.66	0.009	0.017	0.13	0.10	0.06	
35	Mn-Ni-Mo	0.19	0.30	1.35	0.007	0.008	0.76	0.06	0.49	
90(A)	Cr-Mo	0.29	0.25	0.70	0.010	0.012	0.29	1.16	0.35	
90(B)	Cr-Mo	0.28	0.06	0.67	0.010	0.007	0.20	1.06	0.35	
120	Carbon steel	0.33	0.31	0.76	0.008	0.007	0.28	0.24	0.10	
180(A)	Ni-Cr-Mo-V	0.25	0.05	0.26	0.007	0.012	3.66	1.69	0.44	0.12
180(B)	Ni-Cr-Mo-V	0.26	0.05	0.26	0.005	0.010	3.98	1.79	0.45	0.12
250	Cr-Mo-V	0.27	0.24	0.75	0.003	0.002	0.18	1.17	1.22	0.28
400	Mn-Ni-Mo	0.22	0.26	1.41	0.007	0.007	0.76	0.11	0.52	

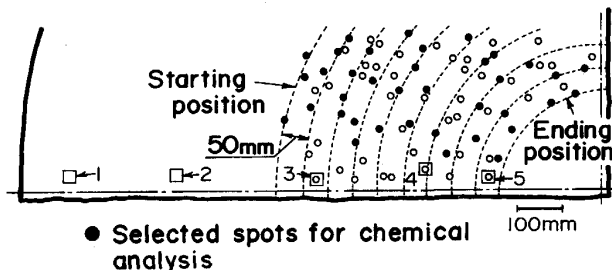
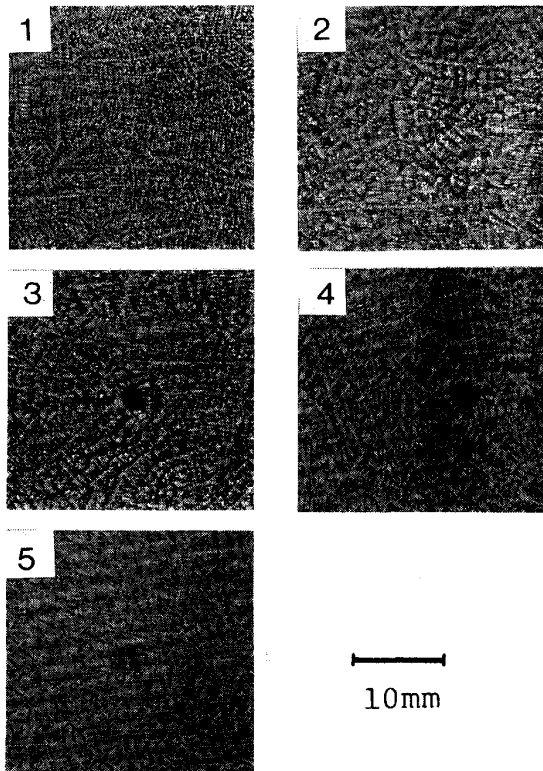


Fig. 1. Position of "A" segregation spots and specimens for chemical analysis.

分して、各領域ごとの偏析スポット数を求めた。また偏析スポットの大きさは、発生領域の表層側、中央および軸芯側においてランダムに選んだ20個の偏析スポットについての平均径を測定した。

## 2.2 逆V偏析スポット内の成分濃度調査

分析用試料は120 t, 180 t (B)および250 t鋼塊より採取した。すなわち Fig. 1 (180 t (B)鋼塊の場合)に示すように、逆V偏析の発生開始より消失する位置まで、約50 mm間隔ごとに逆V偏析を含む20 mm角の試料を3から4個採取した。各試料は、偏析の現出していない試料の側面で健全部濃度を調査した後、偏析スポット以外を除去したのち、プレスによりスポット径を約12 mmまで拡大して、逆V偏析内濃度の調査用試料とした。

また、成分濃度は発光分光分析法(発光スポット径約8 mm, 分析正確度約0.004%, 精度 $\sigma_2 = 0.005\%$ )によりSi, CrおよびMo元素について測定したが、偏析部では1個の試料につき1 mm程度の研磨を繰り返しながら3回分析し、その平均値を逆V偏析内の濃度とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 逆V偏析のスポット数

各鋼塊について調査したところ、逆V偏析スポットの数は大型の鋼塊ほど増加し、成分系によっても異なっているのが認められた。一例として、Si含有量に差のある90 t鋼塊の測定結果を比較して Fig. 2 に示す。これより低Si材の鋼塊では普通Si材よりも逆V偏析の発生領域が狭く、また偏析スポットの数も減少していることがわかる。そこで、逆V偏析の発生程度におよぼす鋼塊の大きさと成分系の影響を明らかにするため、逆V偏析の発生密度を単位面積当たりのスポット数と定義し、鋼塊半径との関係で Fig. 3 に示す。ただし、成分系の違いを便宜的にSi含有量により高Si材(1%以上)、普通Si材(1%以下から0.1%以上)および低Si材(0.1%以下)に大別して示した。これより、逆V偏析の平均発生密度(総測定数/発生領域面積)は鋼塊径の増加とともに減少し、Si含有量が多いほど高くなる傾向が認められた。

つぎに、逆V偏析の発生領域を径方向に分割し、各分

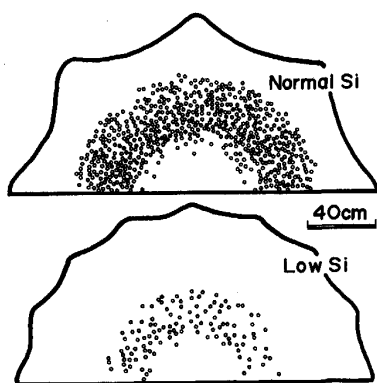


Fig. 2. Distribution of "A" segregation spots in the transverse section of two 90 t ingots.

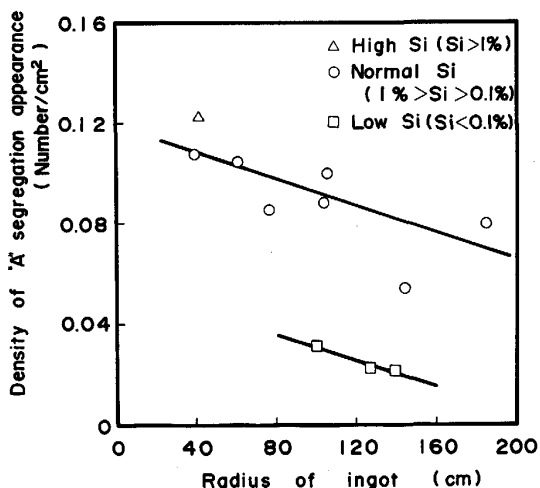


Fig. 3. Relation between the density of "A" segregation appearance and ingot radius.

割領域ごとに求めた偏析の発生密度を、偏析の発生開始位置から消失に至る無次元距離との関係で Fig. 4 に示す。このように、いずれの鋼塊でも偏析領域の中央部で最も発生密度が高く、端部に向かうほど減少するほぼ対称の分布を示している。しかし、その発生密度は鋼塊間で大きく異なっていることから、鋼塊の成分系によっても差が生じるものと考えられる。

### 3.2 逆V偏析の大きさ

逆V偏析スポットの径は、鋼塊の内部側に生成したもののほど、また鋼塊間で比較すると鋼塊径が増加するにつれて大きくなる傾向が認められた。Fig. 5 はそれぞれの位置で測定した逆V偏析スポットの直径と、鋼塊半径との関係を示す。これより前述の傾向が確認され、偏析スポットの直径は低 Si 材を除くと、鋼塊半径の関数として(1)式で表される。

$$A_D = 0.02 \cdot r + 4.2 \dots\dots\dots (1)$$

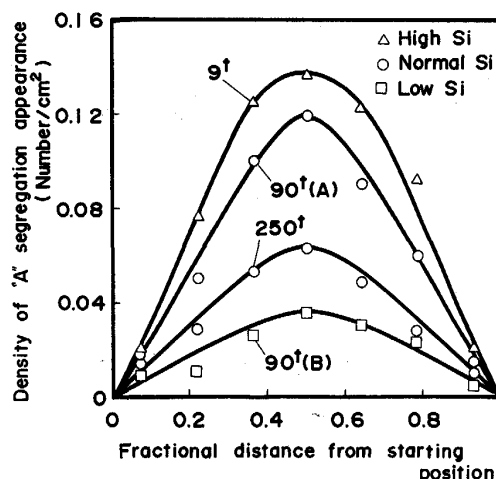


Fig. 4. Density of "A" segregation appearance as a function of fractional distance from starting position.

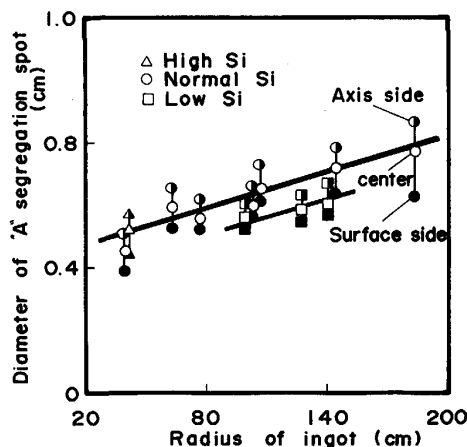


Fig. 5. Relation between diameter of "A" segregation spot and radius of ingot.

ここで、 $A_D$  は偏析スポットの直径 (cm)、 $r$  は測定位置での、鋼塊半径 (cm) である。しかし、低 Si 材では普通 Si 材と比較してやや小さな偏析スポットになる傾向を示し、偏析発生密度の場合と同様に鋼塊成分系の影響と推定される差が認められた。

### 3.3 逆V偏析内の成分濃度

健全部における各元素の成分濃度分析結果を Fig. 6 に、また逆V偏析内の分析結果を Fig. 7 に、それぞれ鋼塊表面側から軸芯に至る無次元距離に対して示す。なお、図中の分析値は鋼塊表面からほぼ同一距離にあつた3から4箇所を平均して示した。

このように、逆V偏析近傍の健全部濃度は位置によって変化せず、取鍋内溶鋼の分析値にはほぼ等しい値を示している。しかし、逆V偏析内の成分濃度は鋼塊の軸芯に近づくにつれて徐々に高くなる傾向を示し、またその増

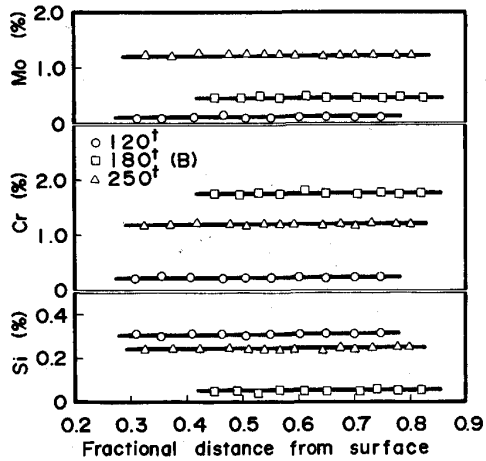


Fig. 6. Change in silicon, chromium and molybdenum contents in radial direction (off the segregation spot).

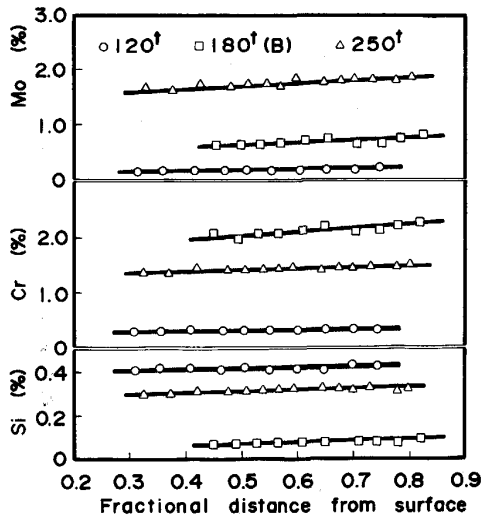


Fig. 7. Change in silicon, chromium and molybdenum contents in radial direction (on the segregation spot).

加傾向は鋼塊の成分系や分析元素で異なっているのが認められた。

以上、逆V偏析の発生密度、スポットの径ならびにその濃度について調査した結果、これらは鋼塊の大きさや成分系により変化することがわかった。そこで、これらに影響する因子について以下に検討した。

#### 4. 考 察

##### 4.1 発生密度に影響する因子

逆V偏析の数とその分布は鋼塊の成分系で大きく変化し、特に低Si材で偏析数の顕著な減少が認められた。低Si化によつて逆V偏析が軽減される現象は、偏析の

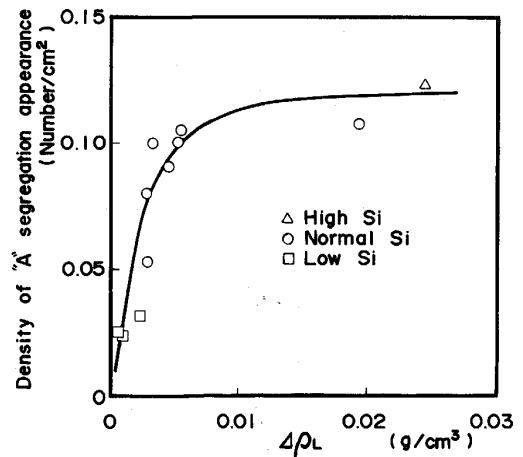


Fig. 8. Relation between the density of "A" segregation appearance and the density difference in the liquid.

発生原因と考えられる凝固前面の濃化溶鋼と母溶鋼との密度差が減少し、発生のための駆動力が小さくなるためか<sup>2)3)</sup>、あるいはデンドライトがち密に発達して濃化溶鋼の流動が制限されるためと考えられる<sup>4)5)</sup>。そこで、前報と同様に母溶鋼と固相率 0.3 における濃化溶鋼の密度を、高橋ら<sup>6)</sup>の示した温度と濃度変化を考慮した比容積変化係数を用いて計算した。逆V偏析の平均発生密度と液相の密度差との関係を Fig. 8 に示す。偏析の平均発生密度は、液相の密度差が大きい材質の鋼塊ほど増加する傾向にあることが分かる。

一方、前報では逆V偏析の発生開始位置はデンドライトの粗さに影響され、鋼塊の材質によらず二次アーム間隔が約 560 (μm) 前後になる位置より発生することを明らかにしたが、偏析の平均発生密度に関しても同様にデンドライトの粗さが影響因子になっている可能性がある。通常、デンドライトの粗さは冷却速度の関数として次式から求められる<sup>7)</sup>。

$$S_{II} = a_2 \cdot \epsilon^{n_2} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $S_{II}$  は二次デンドライトアーム間隔 (μm)、 $\epsilon$  は冷却速度 (°C/min)、 $a_2$  や  $n_2$  は合金元素の種類と量に依存して変化する値である。したがって、成分系によるデンドライトの粗さ傾向は  $a_2$  や  $n_2$  の値を比較することで評価できるものと考えられる。しかし、本供試鋼塊と類似した成分系で測定されている例は少なく、Mn-Ni-Mo 鋼、Cr-Mo-V 鋼および Cr-Mo 鋼の低 Si 材は報告されていない。そこで、Table 2 に示す成分の試料 50 g を、アルゴン雰囲気調整した電気抵抗炉内のアルミナするつぼ中で溶解し、1580°C から 0.5、1 および 5°C/min の各冷却速度で凝固させ、二次デンドラ

Table 2. Chemical composition of specimens.

Material	Chemical composition (wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Cr-Mo	0.27	0.05	0.65	0.005	0.005	0.20	1.01	0.35	
Mn-Ni-Mo	0.18	0.25	1.21	0.009	0.006	0.76	0.13	0.48	
Cr-Mo-V	0.25	0.29	0.66	0.004	0.003	0.20	1.17	1.15	0.25

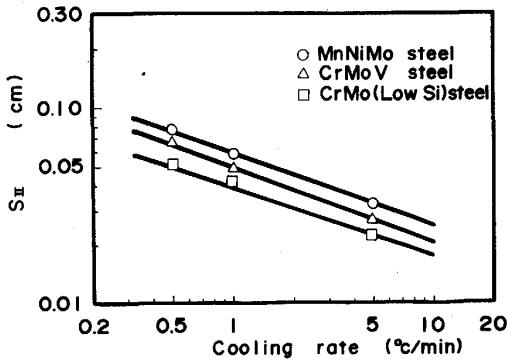


Fig. 9. Relation between secondary dendrite arm spacing and cooling rate.

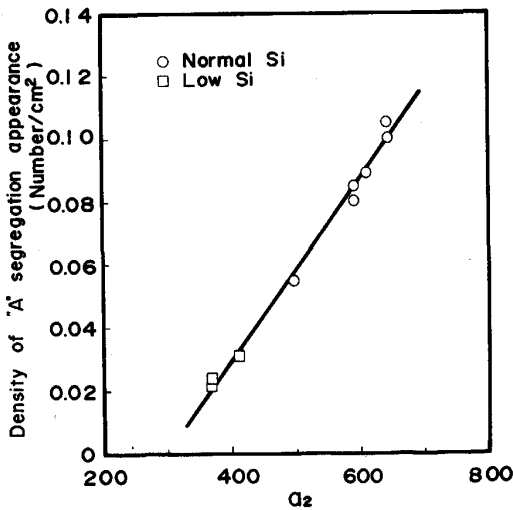


Fig. 10. Relation between the density of "A" segregation appearance and factor  $a_2$ .

イトアーム間隔を測定した。

結果を Fig. 9 に示すが、これから二次アームの間隔は Cr-Mo 鋼の低 Si 材、Cr-Mo-V 鋼、Mn-Ni-Mo 鋼の順に大きくなり、冷却速度との関係を探ると (3) から (5) 式に示す結果となることが分かった。

$$S_{II} = 590 \cdot \epsilon^{-0.36} \text{ (Mn-Ni-Mo 鋼)} \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{II} = 495 \cdot \epsilon^{-0.37} \text{ (Cr-Mo-V 鋼)} \dots\dots\dots (4)$$

$$S_{II} = 410 \cdot \epsilon^{-0.36} \text{ (Cr-Mo 鋼・低 Si 材)} \dots\dots\dots (5)$$

そこで、上記成分系の実測値とともに炭素鋼<sup>8)</sup>、Ni-Cr-Mo-V 鋼<sup>9)</sup> および Cr-Mo 鋼<sup>10)</sup> の普通 Si 材は、それぞ

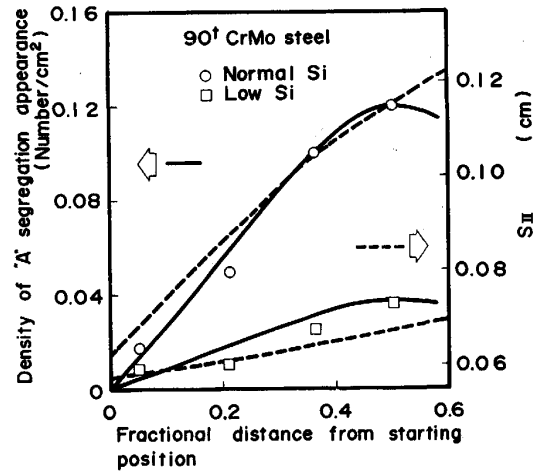


Fig. 11. Comparison between density of "A" segregation appearance and secondary dendrite arm spacing.

れの文献値を用いて、逆 V 偏析の平均発生密度と  $a_2$  値との関係を Fig. 10 に示す。ただし、Cr-Mo 鋼の高 C 材は  $n_2$  の値が他の低 C 材とやや異なることから除外した<sup>11)</sup>。このように、逆 V 偏析の平均発生密度は  $a_2$  値の増加とともに大きくなる、明瞭な相関を有していた。

つぎに、逆 V 偏析発生密度の値は Fig. 4 から明らかのように、位置によって異なっているが、デンドライトの粗さも鋼塊表面からの距離により変化する。そこで前報で示した 90 t 鋼塊の二次アーム間隔と、偏析発生密度の分布を、偏析発生開始位置から消失位置に至る無次元距離に対して Fig. 11 に示す。偏析の発生密度分布の異なる鋼塊では、デンドライトの粗さ分布にも差が認められ、デンドライトの粗い鋼塊ほど偏析の発生密度も大きい値で推移する分布を示す。また、偏析の発生密度とデンドライトの粗さは、発生領域の中央部まで比較的一致した傾向を示している。しかしながら、偏析発生領域の中央部から鋼塊の軸芯にかけてはデンドライトがより粗くなるのに対し、偏析の発生密度は逆に減少するため、デンドライトの粗さ変化とは一致しなくなる。そこで、偏析の発生密度を測定した各位置（発生領域を径方向に 7 等分した範囲の各中央）が固相率 0.3<sup>12)</sup>に達した時点での、鋼塊軸芯位置の液相率を凝固解析<sup>13)</sup>により求め

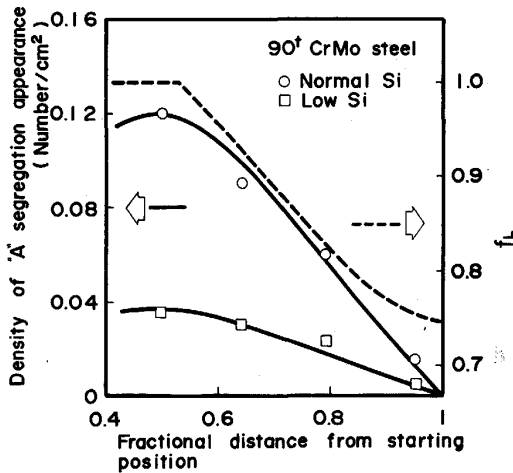


Fig. 12. Comparison between density of "A" segregation appearance and fraction liquid.

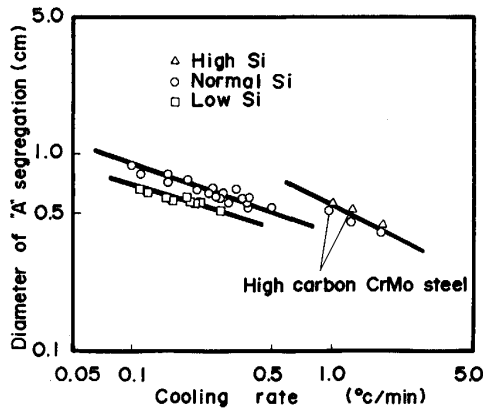


Fig. 13. Relation between diameter of "A" segregation spot and cooling rate.

た。その結果を偏析の発生密度分布と比較して Fig. 12 に示すが、軸芯部の液相率は発生密度が最大となる領域の中央部近傍から減少し始め、偏析の消失位置では液相率が 0.75 程度まで低下している。

すなわち、逆 V 偏析の発生密度は dendrite の粗さに影響され、dendrite が粗くなると偏析の発生密度も高くなるが時間の経過とともに軸芯部の液相率が低下し始めると、凝固領域全体が固液共存相となる加速凝固状況<sup>11)</sup>となるため、鋼塊軸芯近傍では再び偏析の発生密度は低下する傾向を示すものと考えられる。

#### 4.2 偏析の大きさに影響する因子

逆 V 偏析スポットの直径は、鋼塊の径が大きなものほど粗大化しているのが認められた。これは、通常の鍛造用鋼塊ではその径が大きくなるにしたがって凝固時間も長くなることから<sup>14)</sup>、偏析の成長肥大に必要な固液共存状態で保持される時間が増加するためと推定される。

そこで、偏析スポット径を測定した位置の平均冷却速度を凝固解析より求めた。Fig. 13 に逆 V 偏析スポット径と冷却速度との関係を示すが、いずれの鋼塊でも、冷却速度が小さくなるにつれて偏析径は大きくなる。また、9 t および 10 t 鋼塊の高 C 材で他の低 C 材よりも大きな冷却速度依存性を示すと同時に、低 Si 材で普通 Si 材よりもやや小さな偏析径になる傾向が認められる。それぞれに冷却速度との関係を求めると(6)から(8)式に示す結果が得られた。

$$A_D = 0.55 \cdot \epsilon^{-0.50} \text{ (高炭素 Cr-Mo 鋼)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$A_D = 0.40 \cdot \epsilon^{-0.35} \text{ (低炭素普通 Si 鋼)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$A_D = 0.35 \cdot \epsilon^{-0.31} \text{ (低炭素低 Si 鋼)} \quad \dots\dots\dots (8)$$

そこで、偏析スポットの直径と dendrite の粗さにおける冷却速度依存性を、(2)式と同様に定義した(6)から(8)式における  $a_2$  や  $n_2$  の値で比較すると、本供試鋼塊と類似した成分の高炭素 Cr-Mo 鋼では  $n_2$  が  $-0.55^{11)}$ 、その他の材質では約  $-0.35$  が報告されており<sup>8)9)</sup>、偏析スポット径の冷却速度依存性とほぼ一致した値になっている。また低 Si 材の  $a_2$  の値としては 368 が報告されており<sup>9)</sup>、普通 Si 材の 610<sup>8)</sup> から 641<sup>10)</sup> の値と比較するとかなり小さい。したがって、逆 V 偏析スポット径は dendrite の粗さと相関があり、dendrite の粗大化傾向の大きな成分系ほど発生する逆 V 偏析スポットの径は大きくなる。これは逆 V 偏析周囲の dendrite が粗いと存在する液相空間も広く、それが生成する偏析スポット径の増大につながっているものと考えられる。

#### 4.3 偏析成分濃度に影響する因子

逆 V 偏析内の Si, Cr および Mo の濃度は鋼塊内部になるほど高い値を示し、その濃度は元素や鋼塊によって異なっていた。そこでこれらの傾向をより明らかにするため、逆 V 偏析内の成分濃度を取鍋内溶鋼の分析値との比による偏析率にし、鋼塊寸法の違いを凝固解析で求めた冷却速度で表すと、両者の関係は Fig. 14 に示すようになる。このように逆 V 偏析内の成分偏析率 ( $I_S$ ) は、冷却速度の減少とともに大きくなる傾向にあり、成分系で比較するといずれの成分でも Ni-Cr-Mo-V 鋼が炭素鋼や Cr-Mo-V 鋼より大きな冷却速度依存性を示している。また、元素について比較すると、Mo が最も大きな偏析率を示し、Si, Cr の順に小さな偏析率になる傾向にある。したがって、逆 V 偏析内の成分濃度は鋼塊の成分系と、濃化する元素ごとに変化するものと考えられる。

逆 V 偏析は 4.1 および 4.2 節からも明らかなように、横方向の凝固が遅くなつて dendrite が粗くなる位置に生成するが、その発生は固液共存層内に生じた濃化溶

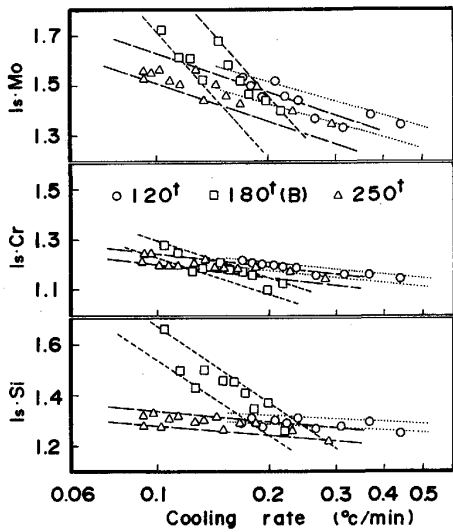


Fig. 14. Relation between segregate index and cooling rate.

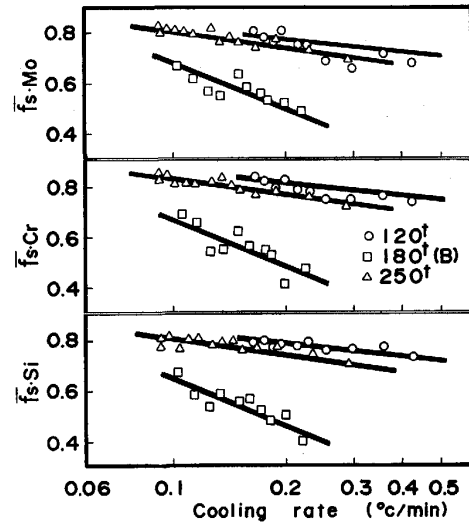


Fig. 15. Relation between average fraction solid for inflow and cooling rate.

鋼が密度差を駆動力として、固相率 0.3 から 0.35 に相当する凝固前面に沿って浮上する過程で、凝固層に捕捉されることにより形成される。その後、偏析周囲の凝固層は時間の経過とともに徐々に固相率を増していくが、逆 V 偏析は成長をつづけるため固相率の上昇に対応したより濃度の高い溶鋼が偏析内に流入する<sup>15)</sup>。したがって、逆 V 偏析内の成分濃度は偏析が発生してから凝固するまでに流入した、デンドライト樹間部の濃化溶鋼濃度の加重平均値と推定される。

凝固が進行していく過程の溶質濃度は、固相内拡散を考慮せずデンドライト樹間の混合が十分であると仮定した場合、(9)式から求められる<sup>16)</sup>。

$$C_L = C_0(1 - f_s)^{k_0-1} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $C_L$  は液相濃度、 $C_0$  は初期濃度、 $f_s$  は固相率、 $k_0$  は平衡分配係数である。一方、逆 V 偏析内における各元素の濃度 (分析値) が、流入したデンドライト樹間濃化溶鋼の平均濃度  $\bar{C}_L$  に等しいと仮定すると次式が得られる。

$$\bar{C}_L = C_0(1 - \bar{f}_s)^{k_0-1} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\bar{f}_s$  は流入した濃化溶鋼の平均濃度に対応する固相率である。さらに、(10)式を変形すると(11)式となる。

$$\bar{f}_s = 1 - (\bar{C}_L/C_0)^{1/(k_0-1)} = 1 - I_s^{1/(k_0-1)} \dots\dots\dots (11)$$

したがって、Fig. 14 に示した偏析率と各元素の平衡分配係数を(11)式に代入することで、逆 V 偏析内に流入した濃化溶鋼の平均固相率を求められる。

そこで前報と同様に Ni-Cr-Mo-V 鋼は  $\gamma$  凝固の、そのほかは  $\delta$  凝固の、いずれも和田ら<sup>17)</sup> の示した分配係

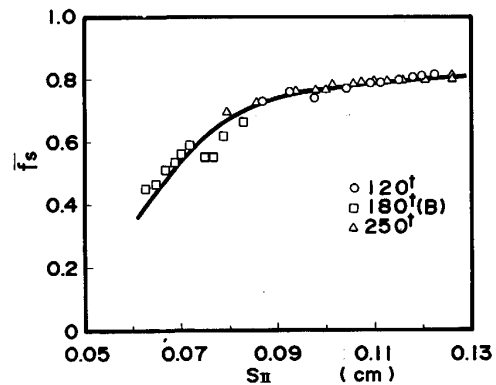


Fig. 16. Relation between average fraction solid for inflow and secondary dendrite arm spacing.

数を用いて平均固相率を計算した。結果を Fig. 15 に冷却速度との関係で示す。これから平均固相率は鋼塊や濃化元素によらず、冷却速度の減少とともに大きくなる傾向が認められる。また、同じ鋼塊で濃化元素による平均固相率の違いを比較すると、計算された値に大きな差は認められないことから、各元素における濃化程度の差は元素の分配係数の違いによつて生じたものと考えられる。つぎに鋼塊間の差を比較すると、特に低 Si 材の Ni-Cr-Mo-V 鋼で平均固相率が小さくなっている。本鋼種の特徴はデンドライトがち密に発達することであり、偏析内の成分濃度にもデンドライトの粗さが影響しているものと推定される。そこで Fig. 15 に示した平均固相率と冷却速度との関係を、(2)式を用いて平均固相率と二次デンドライトアーム間隔との関係を求めたところ Fig. 16 に示すとおりとなつた。ただし、平均固相率

は Si, Cr および Mo の各計算値の平均で示した。これより鋼塊で異なった冷却速度依存性を示した平均固相率は、偏析周囲のデンドライト粗さに影響されて変化していたことがわかる。これは、発生した偏析近傍のデンドライトが粗いと、樹間液相の透過率も大きくなり<sup>18)</sup>、より高い固相率の濃化溶鋼まで偏析内に流入しやすくなるためと考えられる。したがって、逆V偏析内の成分濃度は濃化する元素の分配係数と、周囲のデンドライト粗さに影響されて変化するものと考えられる。

## 5. 結 論

成分系と大きさの異なる鍛造用鋼塊を切断して、逆V偏析のスポット数や大きさおよび成分の濃化程度を調査するとともに、それぞれの状況に影響している因子を検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 偏析スポット数の分布は、偏析生成領域の中央部で最も多く、鋼塊の表面や軸心側で減少するが、鋼塊の表面側ではデンドライトの粗さに、軸心側では軸心部における液相率の低下に影響されていた。また、偏析スポットの総数は、鋼塊の成分系によっても変化するが、成分系によるデンドライトの粗さ傾向と良い相関が認められた。

(2) 偏析スポットの径は、鋼塊の内部側ほど、また、大型鋼塊ほど大きくなるが、その増加傾向はデンドライトの粗い成分系ほど大きくなった。

(3) 偏析スポットの成分濃度は、元素や鋼塊の成分系

で変化するが、元素の分配係数と、偏析近傍のデンドライト粗さに影響されていた。

## 文 献

- 1) 山田人久, 桜井 隆, 竹之内朋夫: 鉄と鋼, 75 (1989), p. 97
- 2) T. FUJII, D. R. POIRIER and M. C. FLEMINGS: Metall. Trans. B, 10 (1979), p. 335
- 3) 拝田 治, 岡野 忍, 江見俊彦, 河西悟郎: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 954
- 4) 中川義隆, 前田健次, 鈴木是明, 谷口晃造: 鉄と鋼, 62 (1976), A41
- 5) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1571
- 6) 高橋忠義, 工藤昌行: 学振 19 委-No. 9949 (昭和 51 年 9 月)
- 7) M. C. FLEMINGS: Trans. Am. Found. Soc., 69 (1961), p. 422
- 8) 鈴木 章, 鈴木 武, 長岡 豊, 岩田至弘: 金属学会誌, 32 (1968), p. 1301
- 9) 岩田至弘, 戸田晴彦, 新実高保, 三浦正淑, 永田弘之: 鉄と鋼, 62 (1976), A 37
- 10) 鈴木 章, 長岡 豊: 金属学会誌, 33 (1969), p. 658
- 11) 鈴木是明, 谷口晃造, 広田 謙: (株)日本製鋼所, 鉄鋼基礎共同研究会, 特殊製錬部会提出資料 1977 年 5 月
- 12) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 53
- 13) 山田人久, 桜井 隆, 竹之内朋夫, 岩波義幸: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 1706
- 14) 田代晃一, 轟木 透, 木村重夫: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1479
- 15) 浅井滋生, 井上 肇, 中戸 参, 鞭 巖: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1502
- 16) W. G. PFANN: Zone Melting (1958) [John Wiley & Sons, New York]
- 17) 和田次康, 和田春枝: 金属学会第 61 回大会講演概要集 (1967), p. 174
- 18) 高橋忠義, 工藤昌行, 永井慎一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 623