

© 1987 ISIJ

キルド鋼塊の逆V偏析におよぼす鋼塊形状と成分の影響

論文

土田 裕*・中田正之*²・国定泰信*²・手嶋俊雄*²

Influence of Ingot Shape and Chemical Composition on the Inverse-V Segregation in Killed Steel Ingots

Yutaka TSUCHIDA, Masayuki NAKADA, Yasunobu KUNISADA and Toshio TESHIMA

Synopsis:

Aluminum-killed-steel slab ingots, whose weight was 5 to 40 t with various chemical compositions, were cast in order to investigate the influence of ingot shape and chemical composition on the formation of inverse-V segregation.

Manganese content in the cross section of segregated streaks were obtained by line analysis with EPMA. The results were as follows:

1) The average number of inverse-V segregation in the ingots had a relationship with ingot thickness D (mm) and density-change coefficient (ϵ), as shown in the next formula.

$$N_{20-70} = -21.57 + 52.84 \epsilon + 0.025D$$

2) Inverse-V segregation streaks concentrated below the hot top in big-end-up ingots of larger wide face taper and taller ingots.

3) Inverse-V segregation was assumed to be formed by the interdendritic fluid flow in the region which had the fraction of solid between 0.51 and 0.86.

Key words: ingot making; inverse-V segregation; macro-segregation; killed steel ingot; segregated streak; interdendritic fluid flow.

1. 緒 言

近年、極厚鋼板をはじめ各種製品は大型化だけでなく品質面での要求度も一段と高まっており、これに対応して、素材側では大単重かつ内質の健全な鋼塊を製造する必要がある。

キルド鋼塊に発生する逆V偏析は、単に成分的な不均一性のみならず水素起因のザクとも重要なかわりをもっており¹⁾、これが極厚鋼板における超音波欠陥の原因となることも多い。逆V偏析そのものについては、実用鋼塊での実態や組織の特徴に関する田代ら²⁾³⁾、成田ら⁴⁾および石黒ら⁵⁾の報告、モデルにて偏析の起源や臨界発生条件につき検討した高橋ら⁶⁾や鈴木ら⁷⁾の報告、成分の影響に関する鈴木ら⁸⁾⁹⁾の報告がある。また、逆V偏析線の発生数に関し、鋼塊形状に注目して解析した木下ら¹⁰⁾の報告、解析的に予測する拜田ら¹¹⁾の報告もある。しかし、鋼塊の大型化、上広化に伴う特徴、偏析線の集

中位置とのかかわり、さらには偏析の程度や偏析形成要因などを含めた詳細な報告は少なく、品質管理面からみた鋼塊内質、あるいは鋳型形状や成分設計を検討するにはまだ十分でないように思われる。

そこで、重量が5~40 tの炭素鋼鋼塊を製造、確性し、逆V偏析の分布と鋼塊形状および成分との関係について調査、解析を実施した。そのため、鋳造にあたっては鋼塊形状の差が比較できるように留意し、偏析の発生に影響の大きいとされている^{12)~14)}C, Si, Moなどの成分濃度が異なる鋼種を選択した。また、ミクロ的な成分濃度の測定値から逆V偏析形成時の固相率を推定し、各種成分の濃化に起因する溶鋼の比容積変化と偏析発生数との相関性を整理するとともに、水素気泡の発生条件につき考察した。さらに、塩化アンモニウム水溶液を用いたモデル実験の観察から逆V偏析と液相流動とのかかわりについても若干の検討を加えた。

昭和 53 年 10 月本会講演大会にて一部発表 昭和 61 年 6 月 19 日受付 (Received June 19, 1986)

* 日本鋼管(株)中央研究所 (Advanced Technology Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² 日本鋼管(株)鉄鋼研究所 (Steel Research Center, Nippon Kokan K. K.)

2. 調 査 方 法

LD 転炉で溶製した Table 1 に示す成分のキルド鋼を下注ぎ法にて鋳込み、Table 2 に示す寸法、形状の 5~40 t の条鋼用および厚板用偏平鋼塊計 15 本（試験用小型鋼塊 2 本を含む）を製造した。この鋼塊を、長辺面の中央でかつ短辺面と平行な縦断面で切断し、表面を機械研削後サルファープリントと塩酸マクロ腐食により逆 V 偏析を現出させ、その特徴と数を測定した。

ついで、この大試料から逆 V 偏析線の横断面を含む小試料を採取し、凝固組織と偏析線の形状や位置関係を確認後、XMA の線分析を行い成分濃度を測定した。

Table 1. Chemical composition of investigated steel ingots (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni
0.12 ~0.62	0.16 ~0.39	0.57 ~1.42	0.010 ~0.022	0.004 ~0.019	0.010 ~0.037	~0.31	~0.33

Table 2. Design factors of ingots.

Weight (t)	Height (H, mm)	Thickness at 1/2 height (D, mm)	Taper of wide face (φ, %)*
5~40	1750~2900	480~820	-3.1~+8.1

* Minus sign: Big-end-down Plus sign: Big-end-up

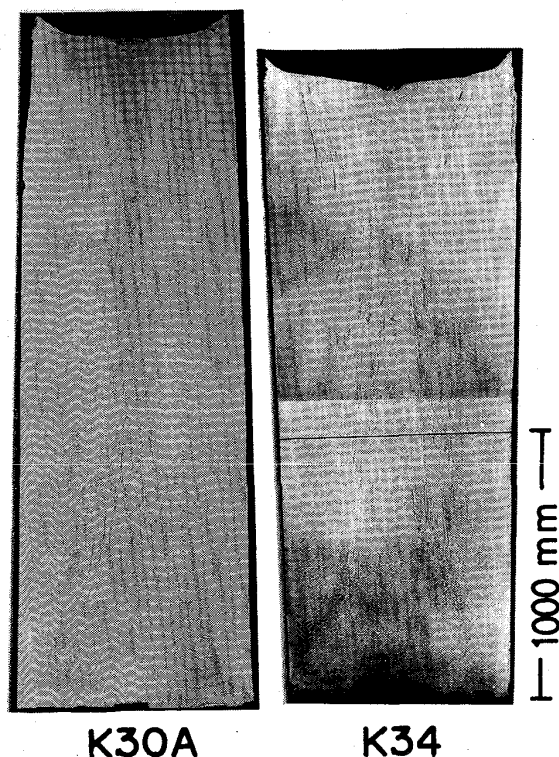


Photo. 1. Example of macro-structures of 0.13%C-0.3%Si steel ingots.

3. 調査および解析結果

3.1 鋼塊高さ方向の偏析線分布

30 t 下広と 34 t 上広鋼塊のマクロ腐食組織を Photo. 1 に示した。鋼塊底部の沈殿晶帯から押湯下端付近までに存在する逆 V 偏析は鋼塊軸心側へ傾斜しているのに対し、それより頭部の押湯内では鋼塊表層側へ傾斜している。ここでは前者の逆 V 偏析だけを取り扱い、鋼塊軸心の最頭部を起点 (0%) として最底部 (100%) までの高さを 5% ごとに鋼塊厚み方向の線を引き、この線分と交わる偏析本数を測定した。

鋼塊高さ方向における偏析線の数の変化を Fig. 1 に示す。各鋼塊には重量に相当する数字と符号を付し鋼塊大きさと形状を区別している。たとえば K10 は 10 t 鋼塊、K40A は 40 t 鋼塊を指す。鋼塊によつて多少差を有するが、偏析線の大部分はいずれも鋼塊本体の 20~70% 付近に存在し、それより底部にはほとんど発生していない。また偏析線の数には、鋼塊形状が下広か上広かにかかわらず、厚い大重量の鋼塊ほど多い傾向にある。以下では、これらの測定値に基づき解析を進める。ここでは、偏析線の大多数が存在する鋼塊の 20~70% 位置を対象とした。

3.2 逆 V 偏析の分布におよぼす鋼塊形状の影響

3.2.1 偏析線の数と鋼塊厚の関係

Fig. 2 に、鋼塊 20~70% 間に存在する偏析線の平均本数 ($\bar{N}_{20-70}$) と押湯を除く鋼塊本体の平均厚 (D) との関係を示す。

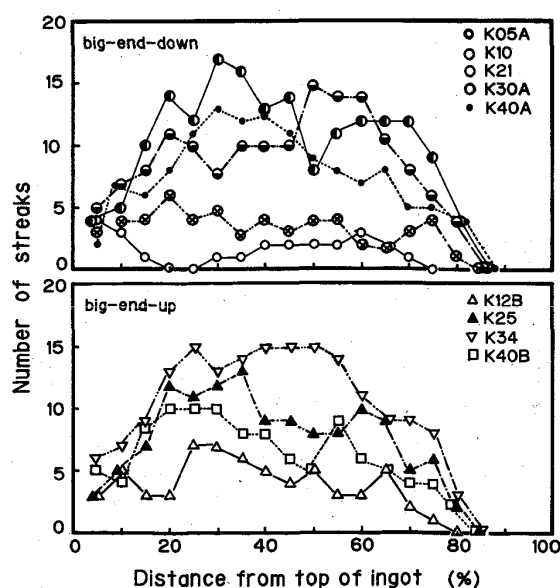


Fig. 1. Distribution of streaks of inverse-V segregation in longitudinal cross section of ingot.

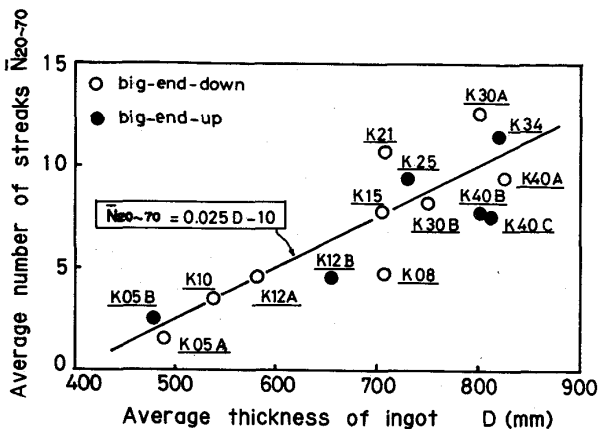


Fig. 2. Influence of thickness of ingot on the number of segregated streaks.

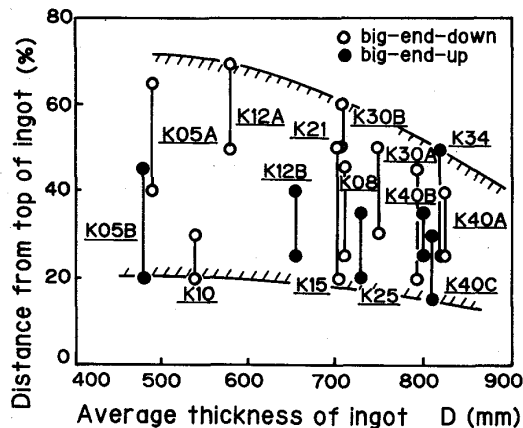


Fig. 3. Relation between thickness of ingot and highly concentrated area of segregated streaks in ingot.

偏析線の平均本数は鋼塊厚の増大に伴ってほぼ直線的に増加し、その関係は(1)式で表された。

$$\bar{N}_{20-70} = 0.025D - 10.0 \quad (1)$$

図中では下広と上広の鋼塊を分類して表示したが、テーパの影響は小さく、上広の鋼塊ほど偏析線の数が増加するとの木下ら¹⁰⁾の傾向とは異なる。なお、各点のばらつきには成分の影響も含まれており、この評価については後述する。

3.2.2 偏析線の集中位置

鋼塊高さ方向のどの位置に偏析線が集中しているかをみるため、 $\bar{N}_{20-70}$ よりも偏析線の本数が多い領域と鋼塊形状との関係を整理してみた。

鋼塊の平均厚みに対しては、Fig. 3のように、明確な相関性はないが、厚い鋼塊の偏析線は頭部側に集中する傾向が強い。

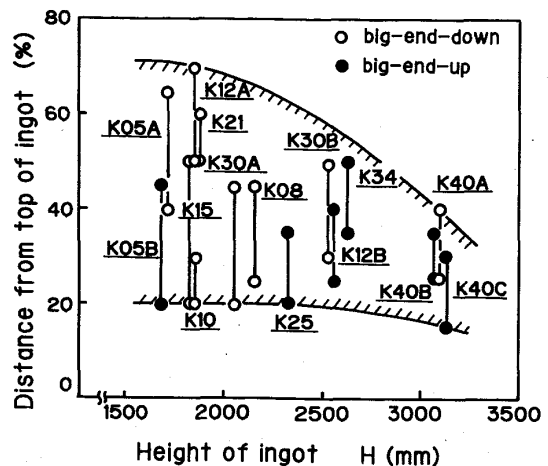


Fig. 4. Relation between ingot height and highly concentrated area of segregated streaks in ingot.

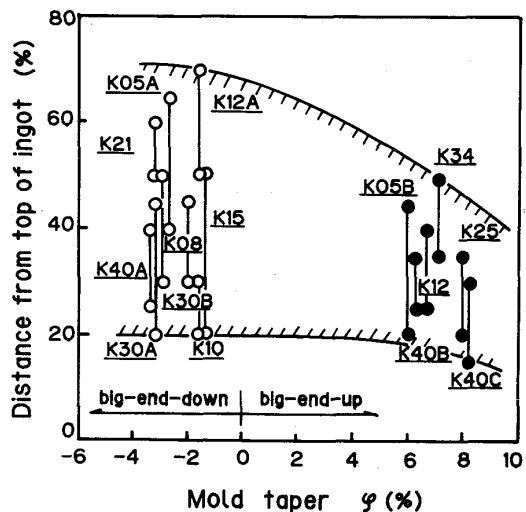


Fig. 5. Relation between mold taper and highly concentrated area of segregated streaks in ingot.

Fig. 4には、鋼塊高さ(H)との関係を示したが、背の高い鋼塊ほど偏析線は頭部側、特に20~50%付近に集中する傾向にある。

鋼塊長辺面のテーパ(φ)に対しては、Fig. 5のように分布している。上広鋼塊ではいずれも頭部の20~50%付近に集中しているのに対し、下広鋼塊ではその位置が一様でない。Photo. 1とFig. 2によれば、肥大品および逆V偏析の発生し始める鋼塊表層からの位置が上広鋼塊と下広鋼塊とではほぼ同じであり、偏析線の平均本数も鋼塊厚みと良い相関性を有する。従って温度勾配や凝固速度、凝固組織などの点からみた偏析線の発生条件は、上広鋼塊と下広鋼塊とで特に差はないと推察されるが、その後軸心側へ傾斜しつつ上方へ移動、成長

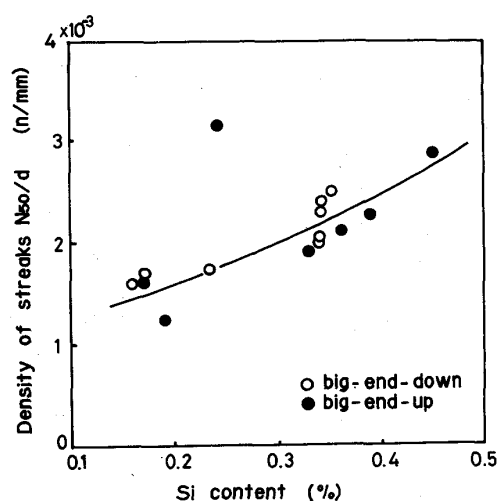


Fig. 6. Effect of Si content on density of inverse-V streaks at the half height of ingot.

できる条件において頭部の厚い上広鋼塊の方が有利なためであろう。

3.3 溶鋼成分の影響

逆V偏析の発生に対して、CやSiの増加はこれを助長し^{8)12)~14)}、Moの添加はこれを抑制する⁷⁾⁸⁾と報告されている。これらの事実を確認するため、偏析線の発生数と成分のかかわりを整理してみた。

鋼塊厚みの影響を除外するため、鋼塊高さの50%位置における偏析線密度 N_{50}/d 、すなわち鋼塊厚み方向の偏析本数 (N_{50}) を偏析の存在する実質鋼塊厚 (d mm) で割った値と、溶鋼中のSi濃度との関係を Fig. 6 に示した。一点を除いて、両者には比較的良好な相関性があり、Si濃度の高い鋼塊ほど偏析線の発生数は増すことがわかる。Cに対しても同様の整理を試みたが、明確な相関性はみられなかった。

一方、鋼塊のマクロ腐食組織を Photo. 2 に示すが、Mo添加鋼 (2.25%Cr-1%Mo 鋼) では、逆V偏析がまったく発生していない。鈴木ら⁸⁾の報告と同様、Moには逆V偏析の低減、あるいは消滅の効果を有することがわかる。

次に、デンドライト樹間での各種成分の濃化によって生ずる比容積 (密度の逆数) 変化を加味し、偏析の発生におよぼす成分の影響を整理してみた。凝固に伴うミクロ的な溶鋼の成分濃度 C_L^i の変化と初期濃度 C_0^i 、固相率 f_s および平衡分配係数 K_0^i の間には (2) 式¹⁷⁾¹⁸⁾ の関係がある。

$$C_L^i = C_0^i (1 - f_s)^{K_0^i - 1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

後述のように、逆V偏析形成時期におけるデンドライト樹間の平均固相率として $f_s = 0.74$ を得ているので、こ

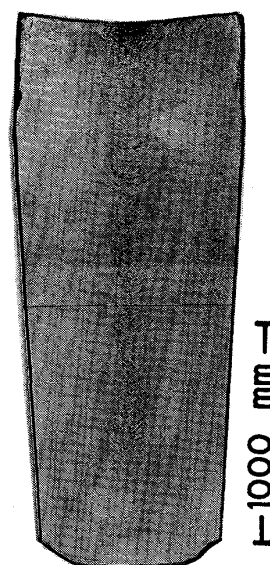


Photo. 2. Macro-structures of 2.25%Cr-1%Mo steel ingot.

Table 3. Values of K_0^i , η_i used and η_i' calculated.

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
$K_0^{15)}$	0.39	0.83	0.83	0.37	0.03	0.75	0.89	0.70
$\eta_i \times 10^{3 \ 15)}$ ($\text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{wt}\%$)	—	1.60	0.08	0.93	2.25	-0.10	0.18	-0.29
$\eta_i'^*$ ($\text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{wt}\%$)	—	0.41	0.02	1.24	6.06	-0.04	0.03	-0.15

$$* \ \eta_i' = \eta_i \times 10^3 \{ (C_L^i / C_0^i)_{f_s=0.74} - 1 \}$$

れに相当する各成分の濃化度 C_L^i / C_0^i を (2) 式から計算できる。また、高橋ら¹⁵⁾はFe-Cを基とした溶鋼の密度変化に与える第三元素の影響を解析し、比容積変化係数 η_i ($\text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{wt}\%$) を求めている。従つて、これらの関係を利用すると、 $f_s = 0.74$ において元素 i の濃化による比容積変化係数 η_i' は (3) 式にて求まる。

$$\eta_i' = \eta_i \times \{ (C_L^i / C_0^i)_{f_s=0.74} - 1 \} \times 10^3 \dots\dots\dots (3)$$

各数値は Table 3 のごとくであり、NiとMoは密度を大きくして溶鋼の浮上を抑え、Siをはじめとする他の元素は密度を小さくして浮上を促進する。したがつて、初期組成を考慮した各鋼塊における比容積変化を (4) 式で定義すると、その大小は偏析線の増減に影響するはずである。また、先述のごとく鋼塊厚も影響するから、この二つの要因と逆V偏析線の平均本数との重回帰をとると、(5)式で表される。すなわち、 ε および D の増大に伴つて $\bar{N}_{20-70}$ は増加する。

また、(5)式にて計算した値を測定値と比較して Fig. 7 に示すが、両者はよく一致している。

$$\varepsilon = \sum_i \eta_i' \times C_0^i \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{N}_{20-70} = -21.57 + 52.84\varepsilon + 0.025D \dots\dots\dots (5)$$

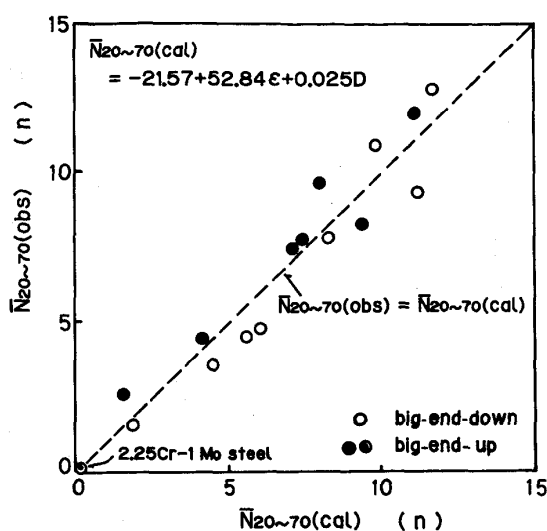


Fig. 7. Comparison of observed and calculated values of average streak numbers.

Table 4. Measured segregation ratio in streaks and estimated values of fraction of solid.

Ingot	Analyzed C_s^{Mn}/C_0^{Mn}	Estimated f_s	Sample numbers
K5A	1.17~1.40	0.60~0.86	2
K30A	1.31~1.37	0.79~0.84	3
K34	1.19~1.39	0.64~0.85	5
K40C	1.13~1.36	0.51~0.84	3

3.4 逆V偏析の成分濃度と形成固相率

K5A, K30A, K34, および K40C 鋼塊から採取した逆V偏析部の小試料につき, XMA の線分析 (ビーム径 50 μm) にてこの部分の Mn 濃度を測定し, 偏析が形成される時期の固相率を推算した。

まず, ミクロ偏析の式(2)から(6)式が得られ, 固相率を求められる。

$$f_s = 1 - (C_L^i / C_0^i)^{\frac{1}{K^M - 1}} \dots\dots\dots (6)$$

したがって, 周辺の dendrite 樹間の溶鋼 C_L^i が流入して逆V偏析を形成, 再凝固したものが XMA で得た偏析部の平均濃度 $\bar{C}_s^{Mn}$ に等しいと考え, 濃化度 C_L^i / C_0^{Mn} に対応した dendrite の固相率 f_s を算出できる。この仮定の妥当性については, 後に簡単な考察を加える。鋼塊表層健全部の化学分析値を初期濃度 C_0^{Mn} , Mn の平衡分配係数を $K^M = 0.83^{15)}$ として計算した例を Table 4 に示した。鋼塊の大きさや冷却速度などによって逆V偏析の発生する条件が異なるためか, 鋼塊間や試料間でやや差を有し, 固相率として $f_s = 0.51 \sim 0.86$ を得た。また, 計 18 点の測定値から求めた平均の固相率は 0.74 であった。

鈴木ら⁷⁾は, 逆V偏析の生成領域を“凝固前面”と定

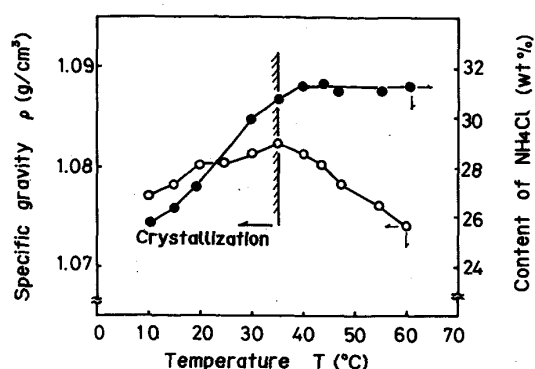


Fig. 8. Changes of specific gravity and NH_4Cl content during the cooling of $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ system.

義し, 炭素鋼ではこの固相率として 0.35 を得ている。一方高橋ら¹⁹⁾のモデルによれば, 凝固遷移層は大きく P 層と q 層に分けられ, その境界の固相率が 0.67 であり, 液相の流動可能な限界固相率は冷却速度に依存してこれより若干増減する²⁰⁾との実験結果を報告している。

本研究での解析によれば, ミクロ的な dendrite 樹間の高濃度溶鋼が流入して逆V偏析を形成する際の平均固相率は, 高橋らの提唱する流動限界固相率に比較すると大きすぎる。これは, 例えば逆V偏析線内での結晶の再溶解に起因する透過率の変化, あるいは溶鋼が移動しつつ再凝固するなど, これらの現象を伴わない通常の凝固挙動とは異なることを示唆している。また, 溶鋼の流入や流出のない状態で成立する(2)式を適用したことも, 固相率を大きく見積つた一つの理由と考えられる。

4. 考 察

4.1 ミクロ的液相の流動と逆V偏析の形成要因

30% 塩化アンモニウム水溶液を用いた実験を実施し, 逆V偏析と類似したチャンネル型偏析¹⁶⁾の形成過程と液相の流動とのかかわりにつき簡単に考察した。

塩化アンモニウム水溶液の冷却過程における液相の平均比重と濃度変化の測定結果を Fig. 8 に示す。水溶液の平均比重は, はじめ温度降下とともに大きくなるが, 結晶を晶出後は逆に小さくなってゆく。また, 液中の平均の塩化アンモニウム濃度は, その晶出によつて徐々に低下し, 水の割合が多くなる。つまり, この系の冷却過程では, 晶出によつて水分の多い液相が排出され, その晶出割合の増加に伴つて排出された液相は浮上しやすくなるのがわかる。

次に, 相対する二長辺面に透明なアクリル板を配し, これと直角な二短辺面を冷却可能な薄型の容器に塩化アンモニウム水溶液を注入し, チャンネル型偏析の周辺に

おける液相の挙動を観察した。冷却開始後、冷却面からこれとほぼ直角方向にデンドライト柱状晶が成長し、側枝も大きくなってくると、固液共存相内で偏析線の源が発生しはじめ、時間経過とともに冷却面側から内側へ傾斜しつつ、やや幅を広げ、上方へ成長してゆく。その後さらに凝固が進むと、新たに何本かの偏析線が容器中心側の固液共存相内に発生しはじめ、先の偏析線とほぼ平行に成長、発達してくる。この間、バルクと接する偏析線の開口部からは、デンドライトの枝を溶断、遊離したと推定される形状の、多数の結晶片の噴出現象が認められた。

一方、偏析線の成長途上に、塩化アンモニウム水溶液で薄めた赤インクを界面前方へトレーサーとして添加、観察した例を Photo. 3 に示す。トレーサーは、時間経過に伴いデンドライト樹間のミクロ的な経路を通って冷却面側へ、つまり固液共存相内を低固相率側から高固相率側へ浸透し、偏析線に到達後この中を上方へ移動する。そして、添加初期には一部に集中していたトレーサーも、デンドライト樹間から偏析線を通ってバルク中へ再び流入し、しだいに添加部から消滅してゆく。

かかる観察結果から、ミクロ的な偏析に起因する液相の濃度と比重の変化が偏析線発生の源動力であり、これらが固液共存相内を移動し、流入補給を繰り返しつつ、チャンネルを形成してゆくことがわかった。

これらの現象をそのまま鋼の凝固に適用できないが、

実用鋼塊の凝固過程で発生する逆V偏析も定性的には同様の機構で形成されたものと推察され、偏析部の濃度から周辺の固相率を推定した3・4項の取扱いにはほぼ妥当と思われる。ただし、偏析線内部においては、濃化溶鋼が移動しつつ再凝固したり、デンドライトを再溶解しつつ²¹⁾発達するとの報告もあり、これらの現象が最終的な偏析部の濃度にどんな影響をおよぼしているか、今後さらに別の角度からの詳細な検討が必要と考える。

4・2 逆V偏析線内の水素性ポロシティの生成条件

著者らは先に、大型鋼塊内ザクの水素依存性について報告¹⁾しているが、初期水素濃度が4 ppm よりも低い場合には、逆V偏析に付随する大型ポロシティの形成を十分に説明し得なかつた。ここでは、溶質濃度から求めた逆V偏析形成時の周辺固相率とのかかわりを基に、ポロシティの発生条件を試算した。

鋼塊の1/2高さ(1.5 m 付近)における逆V偏析を想定し、気泡半径を500 μm に見積もると、気泡が発生する臨界の水素濃度は0.0032%¹⁾となる。

一方、デンドライト樹間における溶鋼中の水素濃度 C_L^H は、初期濃度 C_0^H 、固相率 f_s 、平衡分配係数 K_0^H により(7)式から求められる。また、このミクロ的な濃化溶鋼 C_L^H が逆V偏析線内へ流入後、そこで再び凝固する際の溶鋼濃度 $\bar{C}_L^H$ の固相率 f_s' に対する変化は、同様に(8)式で表される。

$$C_L^H = C_0^H (1 - f_s)^{K_0^H - 1} \dots\dots\dots (7)$$

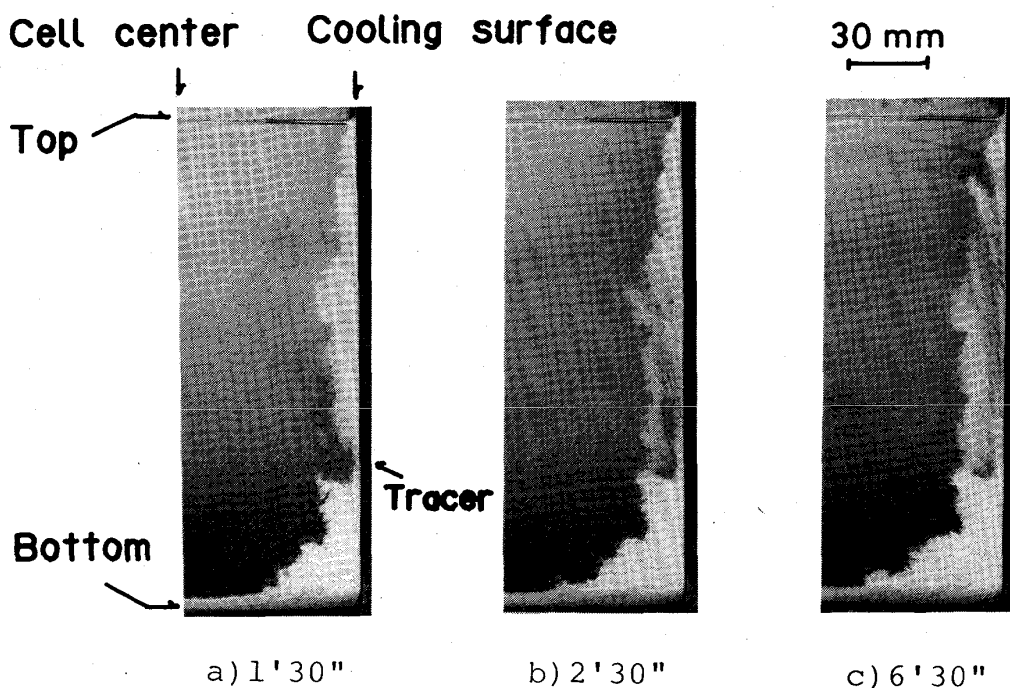


Photo. 3. Observation of liquid-flow behavior around the channel type segregation in $\text{NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ system model. Those numbers show time after tracer addition.

Table 5. Values of I_i in the previous work¹¹⁾.

	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	V
I_i (g/cm ³ ·wt%)	-0.01	-0.63	-0.10	-3.64	-4.24	0.19	-0.01	0.01	0.00

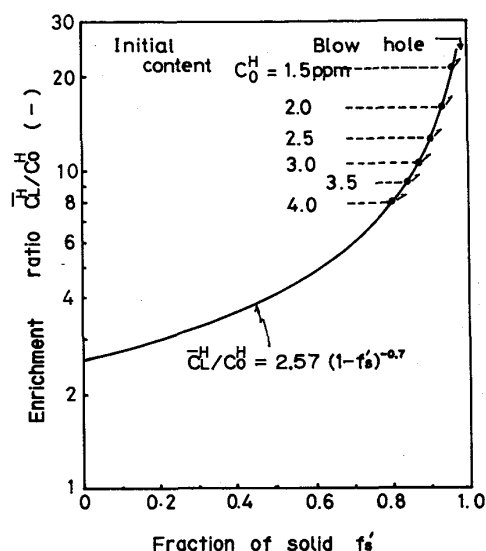
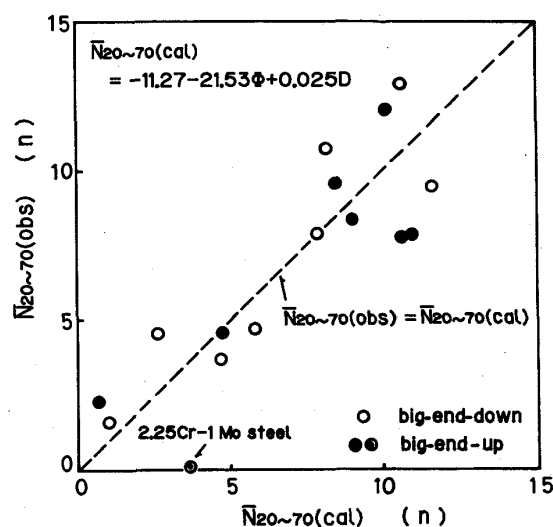


Fig. 9. Effect of initial hydrogen content on the blow-hole formation in streak of inverse-V segregation.


 Fig. 10. The correlation between number of observed streaks and calculated number using Φ value¹¹⁾.

$$\bar{C}_L^H = C_L^H (1 - f_s')^{K_0^H - 1} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、鉄の融点近傍における液相と固相の溶解度比²²⁾から $K_0^H=0.3$ とし、3.3項の解析で得た偏析形成時のミクロ的な固相率の平均値 $f_s=0.74$ を採用した。偏析線内の水素濃度の変化は、濃化度 $\bar{C}_L^H/C_0^H$ として Fig. 9 の実線で表され、初期濃度からみた水素気泡の発生条件 (32 ppm と C_0^H の比) は破線に相当する。したがって、 $\bar{C}_L^H/C_0^H$ が臨界値を越えた場合、すなわち実線と破線の交点よりも濃化度が大きくなると気泡は発生し、初期濃度 C_0^H の低下とともに臨界値は高固相率側へ移動する。例えば、 $C_0^H=4 \text{ ppm}$ では $f_s'=0.8$ 、 $C_0^H=3 \text{ ppm}$ では $f_s'=0.87$ 、 $C_0^H=2 \text{ ppm}$ では $f_s'=0.93$ 以上で気泡になることがわかる。ちなみに、5 mm 程度の幅を有する逆V偏析線内では、初期濃度が 4 ppm の場合に直径 1 mm の水素性ポロシティを形成することになる。この値は、著者ら¹⁾が観察したポロシティの大きさとほぼ等しく良好な一致と思われる。

4.3 逆V偏析の成分依存性について

拜田ら¹¹⁾は、Table 5 のような固液共存相内における溶鋼の濃化に伴う密度変化係数 I_i (g/cm³·wt%) を解析的に導き出し、逆V偏析の発生密度を推定する計算式を得ている。 I_i を用いた場合の逆V偏析への影響を本研

究での解析結果と比較してみる。

溶質の濃化に起因して溶鋼に作用する各元素の浮力の指標を Table 3 と Table 5 で比べてみると、両者では正負の符号の取扱いは逆だが、 η'_i に対して I_i は、Si で 1.5 倍、Mn で 5 倍、P で 3 倍、S で 0.7 倍、Ni で 0.2 倍、Cr で 0.3 倍、Mo で 1.3 倍となっている。

3.3 項での扱いと同様にして、溶鋼成分から (9) 式を介して求まる母溶鋼と濃化溶鋼の密度差 Φ と鋼塊平均厚、および偏析の平均本数の相関性を表す回帰式 (10) 式を得た。

$$\Phi = - \sum_i I_i \times C_i^H \dots \dots \dots (9)$$

$$\bar{N}_{20-70} = -11.27 - 21.53\Phi + 0.025D \dots \dots \dots (10)$$

逆V偏析の平均本数について (10) 式による計算値と実測値を比較し Fig. 10 に示す。両者はほぼ一致するものの、実際には逆V偏析線の存在しない Mo 添加鋼においても逆V偏析本数は計算上ゼロとはならず、(5) 式の計算値よりもやや変動が大きくなっている。

これは、主に両式の ϵ と Φ に対する各元素の効果に依存しており、初期濃度の高い Mn の影響が大きい。また、Fe-C 基の η'_i から求めた ϵ にはすでに C の密度変化の効果も含まれており、各元素に対する I_i から求めた Φ では C と Si の効果が数値として加算されるため、さら

に差を広げる因子となっているようである。

5. 結 言

キルド鋼塊の逆V偏析に関する各種の調査、解析により以下の知見を得た。

1) 逆V偏析線の平均本数 $\bar{N}_{20-70}$ は、鋼塊平均厚 D と成分偏析に起因する密度変化係数 ϵ の増大に伴って増え、次式で表される。

$$\bar{N}_{20-70} = -21.57 + 52.84\epsilon + 0.025D$$

2) 逆V偏析線は、上広の鋼塊ほど、および背の高い鋼塊ほど頭部側（押湯直下～鋼塊 1/2 高さ付近）に集中する傾向にある。

3) 逆V偏析の発生と成長に作用する大きな要因として、溶鋼の濃化に伴う密度変化と浮上、低固相率側からの溶鋼の補給、および結晶の再溶解などが考えられる。そして逆V偏析は、ミクロ的な固相率が 0.51～0.86 に相当するデンドライト樹間の溶鋼が浮上、移動して形成されるものと推察された。

4) 逆V偏析線内では、デンドライト樹間の濃化溶鋼が流入後再凝固すると考えることにより、初期水素濃度が 4 ppm よりも低い鋼塊においても、水素気泡の発生する現象をよく説明できる。

文 献

1) 土田 裕, 宮下芳雄, 今井察一郎, 玉井淳三, 広瀬 猛,

- 田口喜代美: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2488
 2) 田代晃一, 荒木良平, 芳賀三千億, 轟木 透, 大賀栄次: 鉄と鋼, **51** (1965), p. 1893
 3) 田代晃一, 轟木 透, 木村重夫: 鉄と鋼, **57** (1971), p. 1654
 4) 成田貴一, 谷口政行: 鉄と鋼, **56** (1970), p. 212
 5) 石黒守幸, 伊藤雅治, 大須賀立美: 鉄と鋼, **62** (1976), p. 827
 6) 萩原 巖, 高橋忠義: 鉄と鋼, **53** (1967), p. 27
 7) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, **63** (1977), p. 53
 8) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1571
 9) 鈴木是明, 谷口晃造: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1581
 10) 木下勝雄, 北岡英就, 岡野 忍, 江見俊彦: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1868
 11) 拜田 治, 岡野 忍, 江見俊彦, 河西悟郎: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 954
 12) 南 幹男, 新実高保, 三浦正淑, 永田弘之: 鉄と鋼, **56** (1970), S 423
 13) 中川義隆, 前田健次, 鈴木是明, 谷口晃造: 鉄と鋼, **62** (1976), A 41
 14) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, **62** (1976), S 457
 15) 高橋忠義, 工藤昌行: 学振 19 委-No. 9946, 凝固 197 (昭和 51 年 9 月) (私信)
 16) 浅井滋生, 井上 肇, 中戸 参, 鞭 巖: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1502
 17) E. SCHEIL: Z. Metallk., **34** (1942), p. 70
 18) W. G. PFANN: J. Metals, **4** (1952), p. 747
 19) 高橋忠義, 萩原 巖: 日本金属学会誌, **29** (1965), p. 1152
 20) 高橋忠義, 工藤昌行, 永井慎一: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 623
 21) 中田正之, 北川 融, 矢野幸三, 浅野信成, 梶井 明, 玉置稔夫: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1433
 22) 製鋼反応の推奨平衡値 (学振 19 委員会編) (1968), p. 135, 147