

論 文

UDC 669.14-412 : 620.192.43.621.746.393 : 621.746.628

鋼塊V偏析の生成機構について*

鈴木 是明**・宮本 剛 汎***

The Mechanism of Formation of the V Segregation in Steel Ingot

Koreaki SUZUKI and Takehiro MIYAMOTO

Synopsis:

According to many studies on the formation of the V segregation, the formation seems to be affected by the following three factors; the thermal state, the gravitational action, and the dendrite morphology. In order to show how the V segregation would be influenced when each factor was varied independently or mutually, some investigations were made on sand-cast ingots.

The results obtained are summarized as follows:

- 1) The V segregation appeared in the accelerated solidification area of small tapered ingots with a large ratio of height to diameter; the area did not suffer the both end and riser effects.
- 2) The gravity itself did not have any direct effect on the V segregation, but the shape of the segregation was rather influenced by the change of dendrite morphology and the distribution of chemical compositions which were caused by the gravity action.
- 3) The V segregation tended to disappear with an increase of the amount of taper. With the great taper, the concentrated melts to become the V segregation was found to be squeezed from the area corresponding to the V segregation zone toward the feeder head with the progress of solidification.

A discussion was made on the formation mechanism of the V segregation based upon the results described above, and the theory of the suction by the volume shrinkage of molten steel on solidification could well explain the experimental results.

(Received July 12, 1972)

1. 緒 言

鋼塊内部に現出するV偏析は、化学成分の不均一性と、大型硫化物系介在物やシュリンケージキャビティーを伴うため、鋼塊の品質上その軽減が強く望まれている。また最近のように高品質を要求されるようになった鋳鋼品においても、放射線探傷によりV偏析に伴った欠陥が検出される場合があり、従来あまり問題にされなかつた微細な欠陥さえ許容されないようになってきた。このV偏析に関しては従来から多くの研究が行なわれ^{1)~7)}、種々の理論が提唱されているにもかかわらず、未解決の問題を残している。それら研究の多くは鋼塊を切断し、マクロ組織やサルファープリントによりV偏析を観察して、その結果からV偏析の生成機構を考察しているものが多く、推論の域を脱しきれず、理論の実証性に欠けるきらいがあつた。

しかし多くのV偏析に関する研究の中でもMARBURG¹⁾によるダンプテスト、小野寺、荒木田ら²⁾による凝固時

の重力状態を変化させた研究は、単なるマクロ組織の観察から前進して、凝固過程の動的状態をとらえているという点で特異である。したがつて、その研究の考え方にに基づき、V偏析の生成に影響を及ぼすと考えられる種々の条件をそれぞれの鋼塊に付与して凝固させ、与えた条件によつてV偏析がどのように変化するかを調べることにより、V偏析の生成機構を実証的に究明しようとした。

これまでのV偏析の生成機構に対する説明から、V偏析を支配すると考えられる因子としては、1) 熱的状态、2) 重力作用、3) デンドライトの状態の3要素が挙げられる。すなわち、濃化溶鋼の浮上や結晶の沈殿などという現象は重力作用を示すものであり、凝固収縮時のサクションやV偏析の発生位置などは熱的状态を示すものである。さらに、V偏析の形状はデンドライトの状態に関

* 昭和47年4月本会講演大会にて発表
昭和47年7月12日受付

** (株)日本製鋼所室蘭製作所研究所 工博

*** (株)日本製鋼所室蘭製作所

する問題である。これら3要素の複雑な組み合わせによつてV偏析が発生するとすれば、個々の因子がどのようにV偏析に影響するかを明らかにすることにより、V偏析の生成機構は究明されるものと考えられる。

本実験では、上記3因子を個々に変化させた場合と、各因子を相互に組み合わせて変化させた場合に、それぞれV偏析がどのような影響を受けるかという点に問題を絞つて試験した。すなわち、熱的状态の変化の影響を調べるために、それぞれ、高径比、テーパ、ならびに胴径を変化させた鑄型に溶鋼を鑄込み、温度測定、バーテストの結果も考慮に入れて、各鋼塊のV偏析の発生状態を観察した。また、重力作用とデンドライト状態の影響を調べるために、鑄型の軸心と水平面とのなす角度を0°から90°まで5段階に変化させた鑄型に溶鋼を鑄込み、各鋼塊におけるV偏析の発生状態を観察した。一方、熱的状态と重力作用の変化を組み合わせた影響に関しては、テーパを逆に付け、押湯が下から効くようにした鑄型に溶鋼を鑄込み、V偏析の発生状態を調べた。以上の試験鋼塊について、V偏析が鋼塊中心部にV字型に現出する機構の究明に重点を置き、その生成機構を考察した。

2. 試験方法

2.1 熱的状态の変化

V偏析はどのような熱的条件のもとに発生するかを調べる目的で、高径比、テーパおよび胴径を変えて、珪砂乾燥鑄型に鑄込んだ鋼塊について試験した。

2.1.1 高径比の影響

Table 1 に示すように、直径を 80 mm ϕ として、高さを 80, 160 および 300 mm と変化させた高径比の異なる3種類の鑄型に Table 1 に示す化学成分の溶鋼 8~20 kg (Aシリーズ) を 1580°C で上注ぎで鑄込んだ。これらの鋼塊を軸心を含む面で縦断し、サルファープリント、マクロ腐食によりV偏析の発生状態と高径比の関連を調べた。

2.1.2 テーパの影響

前項の高径比の影響に関する試験から、V偏析の発生に十分な高径比を有すると考えられる鋼塊形状として、80 mm ϕ \times 300 mm H を基本形状に選び、Table 2 に示すように、それぞれ 2.6~26.6% の6種類のテーパを付与した鑄型に Table 2 に示す化学成分の溶鋼 20 kg (Bシリーズ) を 1580°C の温度で上注ぎで鑄込んだ。これらの鋼塊は、それぞれ底部から 60, 120, 180, 220, 260, 300 mm の各位置に Pt-Pt-Rh 熱電対を挿入して温度測定を行なつた後、軸心を含む面で縦断し、テーパ量とV偏析の関係および温度測定結果より求めた凝固速度とV偏析の関係を調べた。また、テーパを変化

Table 1. Characteristic data of examined ingots with various ratio of height to diameter.

	Chemical composition (%)					Wt (kg)	Size (mm)					H/D
	C	Si	Mn	P	S		D_t	D_b	D_f	H_1	H_2	
A1	0.32	0.38	0.54	0.013	0.030	8	80	80	100	80	100	1.0
A2	0.32	0.38	0.54	0.013	0.030	13	80	80	100	160	100	2.0
A3	0.30	0.42	0.78	0.011	0.033	20	80	80	100	300	100	3.8

D_t : The top diameter of an ingot, D_b : The bottom diameter of an ingot, D_f : The diameter of a feeder head, H_1 : The height of an ingot, H_2 : The height of a feeder head

Table 2. Characteristic data of examined ingots with various taper.

	Chemical composition (%)					Wt (kg)	Size (mm)					Taper* (%)
	C	Si	Mn	P	S		D_t	D_b	D_f	H_1	H_2	
B1	0.28	0.39	0.74	0.012	0.014	20	84	76	101	300	100	2.6
B2	0.31	0.30	0.69	0.015	0.012	20	87	73	105	300	100	4.6
B3	0.26	0.37	1.01	0.017	0.013	20	90	70	110	300	100	6.6
B4	0.32	0.50	0.76	0.016	0.013	20	100	60	120	300	100	13.4
B5	0.28	0.51	0.70	0.016	0.012	20	110	50	132	300	100	20.0
B6	0.29	0.54	0.83	0.015	0.012	20	120	40	144	300	100	26.6
C1	0.24	0.35	0.68	0.008	0.030	65	120	120	144	480	160	0
C2	0.26	0.30	0.70	0.006	0.021	65	125	115	150	480	160	2.0
C3	0.24	0.35	0.68	0.008	0.030	65	140	100	168	480	160	8.4
C4	0.26	0.30	0.70	0.006	0.021	65	160	80	193	480	160	12.6
C5	0.24	0.35	0.68	0.008	0.030	65	180	60	216	480	160	25.0

* Taper: $\frac{D_t - D_b}{H_1} \times 100$

Table 3 Characteristic data of examined ingots with various diameter.

	Chemical composition (%)					Wt (kg)	Size (mm)					Pouring temperature (°C)
	C	Si	Mn	P	S		D_t	D_b	D_f	H_1	H_2	
D1	0.24	0.34	0.77	0.012	0.018	90	100	100	150	600	150	1 560
D2	0.24	0.34	0.77	0.012	0.018	400	200	200	300	600	300	1 560
D3	0.24	0.34	0.77	0.012	0.018	1 350	300	300	450	900	450	1 560
D4	0.24	0.34	0.77	0.012	0.018	3 500	400	400	600	1 200	600	1 560
D5	0.24	0.39	0.68	0.013	0.016	3 500	400	400	600	1 200	600	1 540

させることにより、鋼塊内の化学成分の分布がどのように変化するかを調べるために、Bシリーズの鋼塊では寸法が小さく、明りょうな傾向が現われないで、鋼塊寸法を大きくした $120\text{ mm } \phi \times 480\text{ mm H}$ を基本形状として Table 2 に示すようにテーパを 0~25% の 5 種類に変化させた鑄型に、Table 2 に示した化学成分の溶鋼 65 kg (Cシリーズ) を 1580°C の温度で上注ぎで鑄込んだ。このCシリーズの鋼塊を縦断しサルファープリント、マクロ組織を調べた後、軸心に沿って 50 mm ピッチで分析試料を採取して、分析に供した。

2.1.3 胴径の影響

V偏析の生成に十分な高径比を有する鋼塊において、V偏析に及ぼす凝固時間の影響を調べる目的で、高径比を 3 ないし 6 として鋼塊の胴径を変化させた (Dシリーズ)。これらの鋼塊は $100 \times 100 \times 600$, $200 \times 200 \times 600$, $300 \times 300 \times 900$ および $400 \times 400 \times 1200\text{ mm}$ の角柱状鑄型に Table 3 に示す化学成分の溶鋼を $1540 \sim 1560^\circ\text{C}$ の温度で下注ぎにより鑄込んだ。このうち $400 \times 400 \times 1200\text{ mm}$ の鋼塊に対しては、凝固進行状況を調べる目的でバーテストを別に行なつた (D_5 鋼塊)。各鋼塊を縦断してV偏析の発生状態を調べた。

2.2 重力作用とデンドライトの状態の変化

V偏析に及ぼす重力の影響ならびにデンドライト状態の変化を調べるために、傾斜角度を種々変化させた珪砂乾燥鑄型に 3.5 t の溶鋼を鑄込み、それらの鋼塊に発生するV偏析の状態を調べた。鑄型を傾斜させると、鋼塊軸心と重力の方向がずれるので、鋼塊では重力の方向が変化したことになる。もし、V偏析が本質的に重力偏析の一種であれば、これらの傾斜鋼塊におけるV偏析の発生状態は、傾斜角度によつて変化するはずである。またこれらの傾斜鋼塊では、鋼塊内のデンドライトの状態にも変化が現われるので、V偏析に及ぼすデンドライト状態の影響も調べることができる。

供試鋼塊は Fig. 1 に示すように $400 \times 400 \times 1200\text{ mm}$ の角柱状鑄型を水平面に対して 0° , 22.5° , 45° , 77.5° および 90° に傾斜させ、Table 4 に示す化学成分の溶鋼

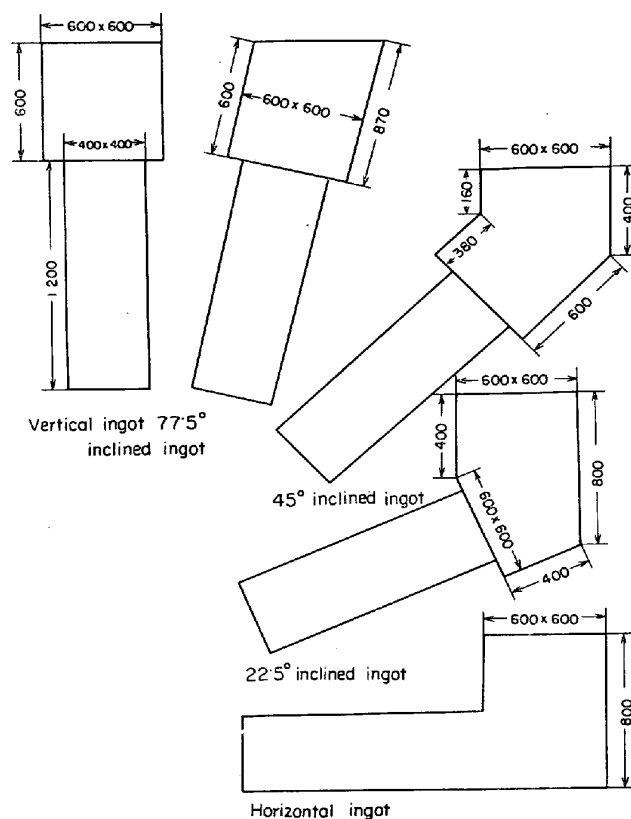


Fig. 1. Shapes of inclined ingots (mm).

を $1530 \sim 1560^\circ\text{C}$ の温度で下注ぎで鑄込んだものである (Eシリーズ)。これら鋼塊を軸心を含む面で縦断し、V偏析の発生状態を観察するとともに鋼塊内部の各位置の化学成分の分布状態を調べた。

2.3 重力作用と熱的状态の変化を組合せた場合

重力作用と熱的状态を同時に変化させ、両者が組み合わさつて変化した場合にV偏析にどのように影響するかを調べるため、Fig. 2 に示すようにテーパを上から下に付け、下部から押湯効果が効くようにした鑄型に、Table 5 に示す化学成分の溶鋼 30 kg を 1580°C の温度で押湯側から上注ぎで鑄込んだ (Fシリーズ)。これら鋼塊のテーパの付いた部分は Table 5 に示すように、 $50\text{ mm } \phi \times 300\text{ mm H}$ を基本として、テーパを 0, 12.3, 24% と変化させたものである。これら供試鋼塊は軸心

Table 4. Characteristic data of ingots with various inclined angle.

	Chemical composition (%)					Wt (kg)	Inclined angle (°)	Pouring temperature (°C)	Name of ingot
	C	Si	Mn	P	S				
E1	0.29	0.38	0.65	0.009	0.008	3500	0	1 530	horizontal ingot
E2	0.20	0.29	0.67	0.012	0.020	3500	22.5	1 540	22.5° inclined ingot
E3	0.24	0.65	0.67	0.011	0.020	3500	45	1 530	45° inclined ingot
E4	0.20	0.27	0.65	0.012	0.020	3500	77.5	1 540	77.5° inclined ingot
E5	0.24	0.34	0.77	0.012	0.018	3500	90	1 560	Vertical ingot

Table 5. Characteristic data of hot bottom ingots.

	Chemical composition (%)					Wt (kg)	Size (mm)			Another Size (mm)	Taper (%)
	C	Si	Mn	P	S		D_t	D_b	H_1		
F1	0.28	0.46	0.65	0.012	0.027	25	50	50	300	$D_1 : 80$ $H_1 : 70$	0
F2	0.29	0.42	0.60	0.012	0.030	25	70	30	300	$D_2 : 100$ $H_2 : 350$	12.4
F3	0.28	0.42	0.66	0.013	0.031	25	90	25	250	$D_3 : 80$ $H_3 : 100$ $L : 180$	24.0
G1	0.23	0.32	0.71	0.011	0.022	500	120	120	480	$D_1 : 160$ $H_1 : 150$	0
G2	0.23	0.32	0.71	0.011	0.022	500	125	115	480	$D_2 : 200$ $H_2 : 500$	2.0
G3	0.23	0.32	0.71	0.011	0.022	500	140	100	480	$D_3 : 540$ $H_3 : 350$ $L : 900$	8.4
H	0.33	0.32	0.55	0.013	0.031	25	90	24	250	equal to F	24.0

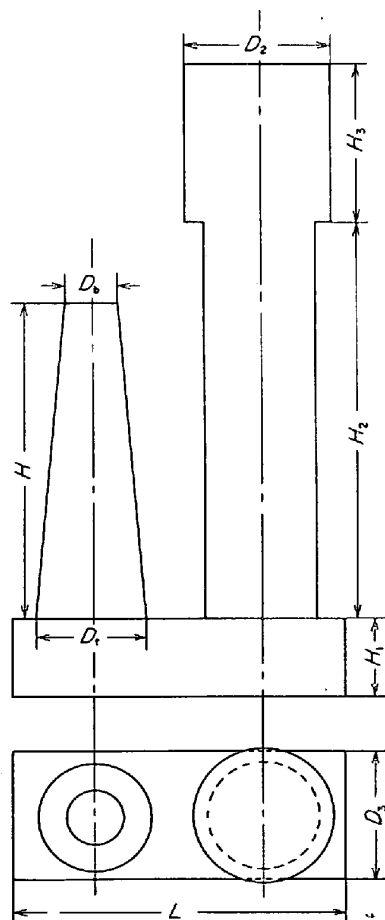


Fig. 2. Shape of hot bottom ingot.

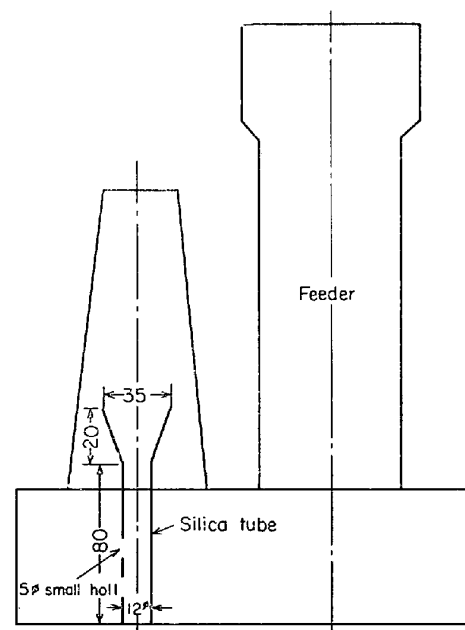


Fig. 3. Geometry of hot bottom ingot with silica tube (mm).

を含む面で縦断してV偏析の発生状態を調べた。また、Fシリーズのような小型の鋼塊では鋼塊内の化学成分の分布状態が明りように現われないので、同様な形状を持った大型の鋼塊 (Gシリーズ) についても試験を行なった。このGシリーズのテーパの付いた部分は、Cシリーズと同様120 mm ϕ \times 480 mm Hを基本としたものである。これら鋼塊は2.0、8.4%のテーパを付け Fig. 2

に示す形状の鑄型に Table 5 に示す化学成分の溶鋼 500 kg を 1580°C の温度で押湯側から上注ぎで鑄込んだものである。Gシリーズの鋼塊を縦断し、化学成分分析試料を軸心に沿って 50 mm ピッチで採取し、分析に供した。さらに F 3 鋼塊の鑄型と同一寸法の鑄型の下部に Fig. 3 に示すようにロート状の石英管を予熱せずに挿入し、Table 5 の H に示す溶鋼を鑄込温度 1580°C で押湯側から上注ぎで鑄込んだ。石英管の上端の寸法は鋼塊の自由晶帯の直径とほぼ同一にしてあるため、テーパの付いた部分への給湯は下部の小孔から石英管を経て行なわれる。この鋼塊を軸心を含む面で縦断し、サルファープリント、マクロ組織を観察した。

3. 試験結果および検討

3.1 熱的状态の変化の影響

3.1.1 高径比の影響

Photo. 1 に 80 mm ϕ の円柱状鋼塊の高さを変えて、高径比を 1.0, 2.0, 3.8 と変化させた鋼塊縦断面のサルファープリントを示す。

これより V 偏析の発生は高径比に強く影響されることがわかる。すなわち、V 偏析は高径比 1.0 では認められず、2.0 で現われ始め 3.8 で明りように認められる。一般に高径比は側面と底部の冷却効果の効き方の程度を示すものであり、高径比が大きくなるほど、側面の冷却効果が鋼塊の凝固に強く効くことを意味する。また、V 偏

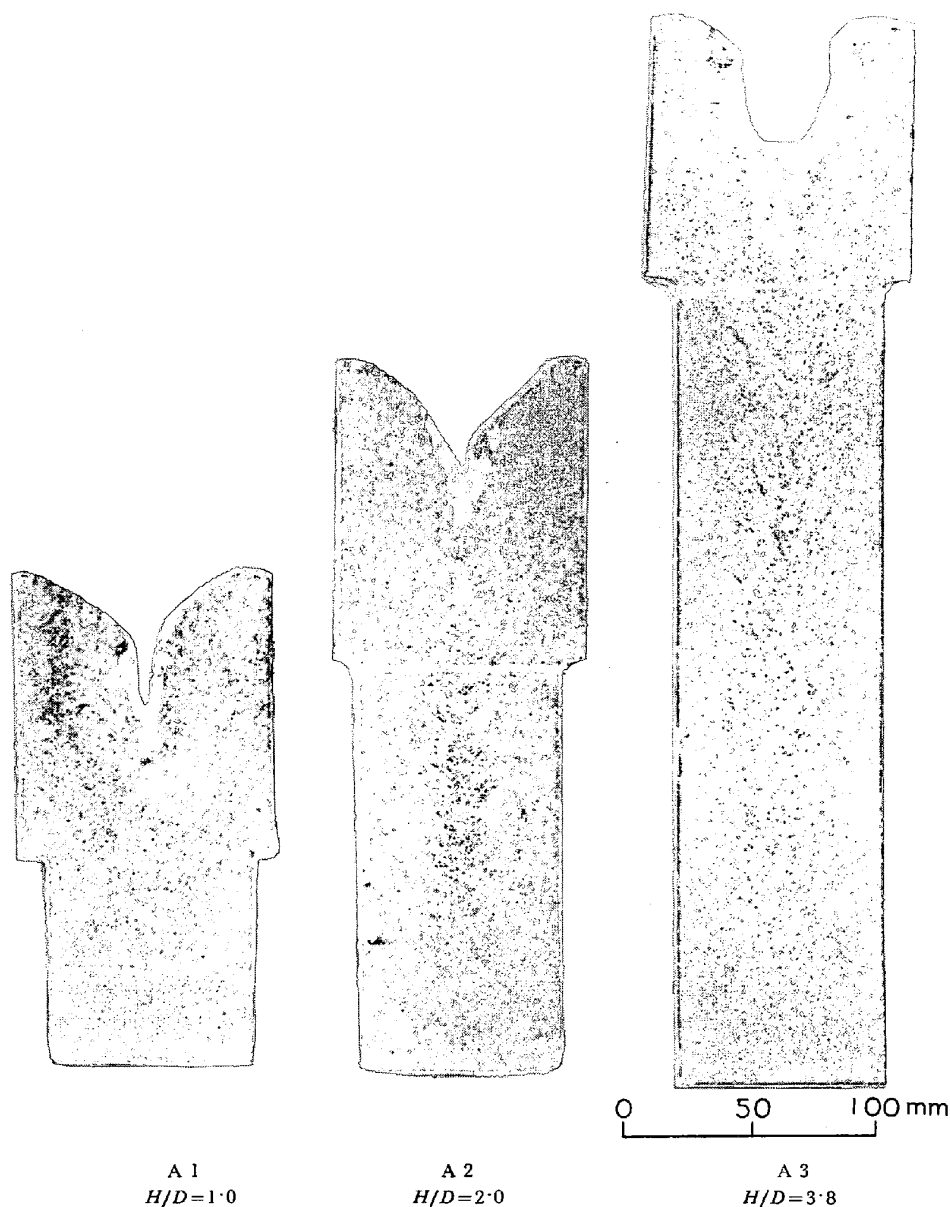


Photo. 1. Sulfurprints of ingots with various ratio of height to diameter.

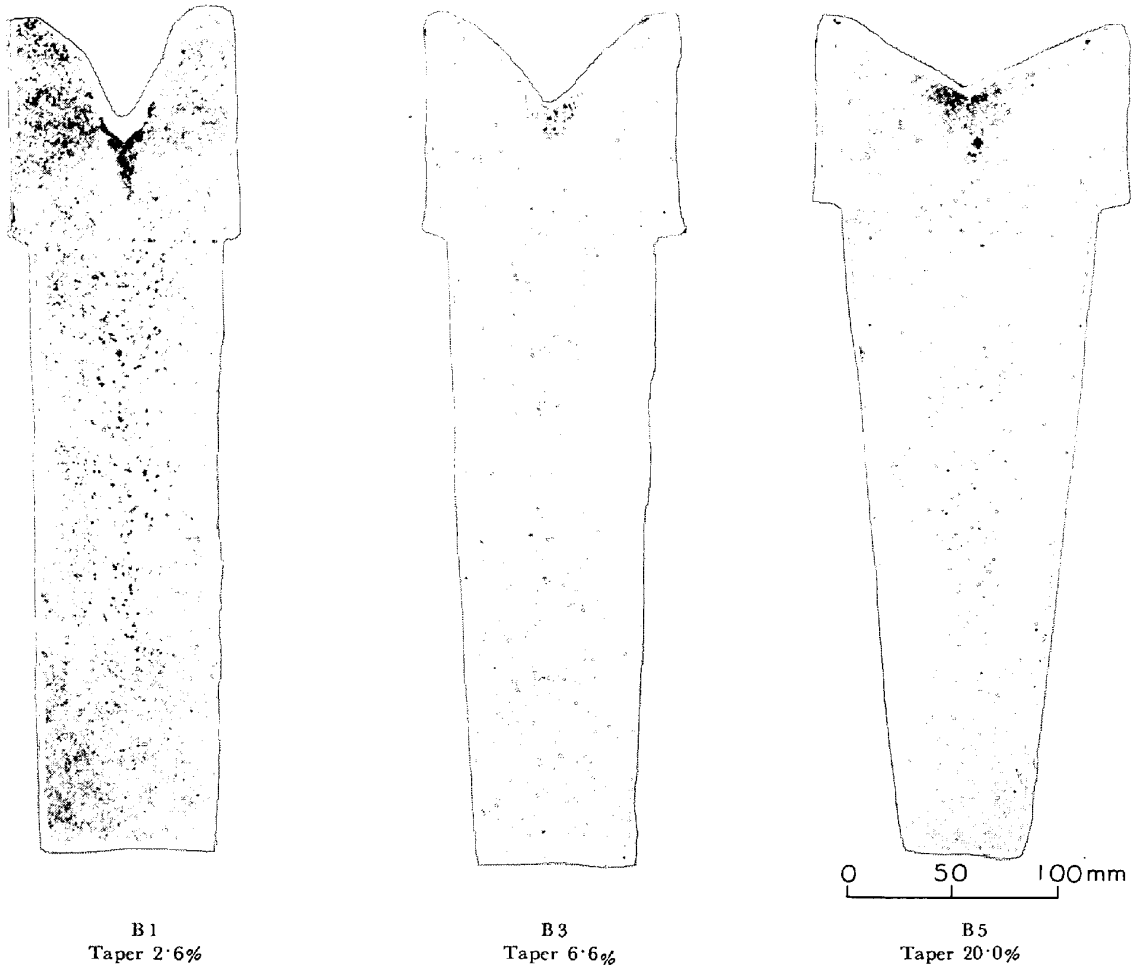


Photo. 2. Sulfurprints of hot top ingots.

析が明りように現われている高径比 3.8 の鋼塊 (A 3) では, V 偏析は押湯の給湯領域である押湯の直下から 50 mm の範囲と, 端面の冷却効果領域に相当する底面から 100 mm の範囲には発生していないことから, V 偏析は側面の冷却効果によつて凝固する領域に現われるものと思われる.

3.1.2 テーパーの影響

高径比を変えて試験した結果から, 側面の冷却効果に強く影響されて凝固する領域に V 偏析が現われるとすると, 側面のテーパーを変えて側面の冷却効果の働きを変化させることにより, V 偏析の発生状態にその影響が現われるはずである. V 偏析が発生するのに十分な高径比 3.8 を有する 80 mm ϕ \times 300 mm H を基本形状として, これに 2.6~25% のテーパーを付与した鋼塊の中から B 1, B 3, B 5 の縦断面のサルファープリントを Photo. 2 に示す. Photo. 2 から明らかなように, テーパーを増加させると個々の偏析片が小さくなり, V 偏析が軽減されてゆき, しかも V 字型も鋭角的な V 字型から U 字型へ, さらに偏平な U 字型へと変化してゆく. この V 偏析の偏析片と水平面とのなす角度とテーパー量との

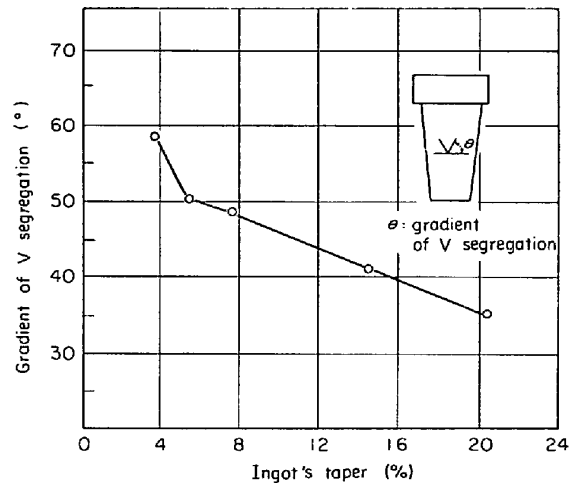


Fig. 4. Relation between ingot's taper and gradient of V segregation.

関係は, Fig. 4 に示すように, テーパー量の増加に伴い偏析片と水平面のなす角度は小さくなる傾向が明らかに認められる.

つぎに, テーパーが各鋼塊の凝固にどのように影響するかを調べる目的で, おのおののテーパー付き鋼塊 (上押湯鋼塊) の軸心に沿つて温度測定を行なつた. Fig. 5

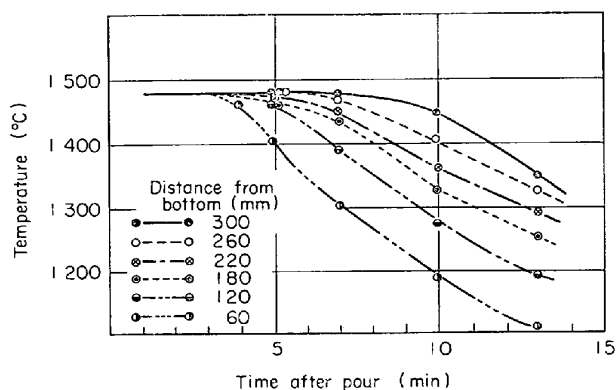


Fig. 5. Measured temperature distribution of hot top ingot (B4).

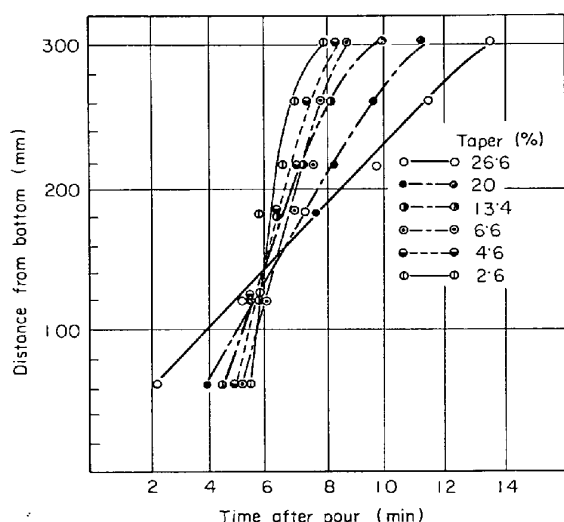


Fig. 6. Measured solidification rate of hot top ingots (B series).

はそれらの測定の例としてテーパー量が 13.4% の鋼塊 (B4) の結果を示したもので、鋼塊底部より順次凝固してゆくことがわかる。これらの温度測定結果より、1460°C を凝固温度とし、鋼塊各位置における凝固時間を求めて Fig. 6 に示す。

Fig. 6 から明らかなように、テーパー量の増加に伴い、縦方向の凝固速度が小さくなっていくが、これは、つぎのように解釈される。すなわちテーパー量が小であれば側面の冷却効果によって凝固する領域の温度勾配が小さく、押湯の給湯効果と端面の冷却効果の及ばない部分は、その凝固時間がほぼ等しくなり、縦方向に急速に凝固する領域となる。一方、テーパー量が大きいと縦方向に温度勾配が大きくなり、下からの凝固に指向性が現われ、押湯効果や端面効果のない領域でもその領域が縦方向に急速に凝固せず、徐々に下から凝固が進行する。このようにテーパー量の変化は下からの凝固速度を変化させることになり、サルファープリントで認められるV偏析の

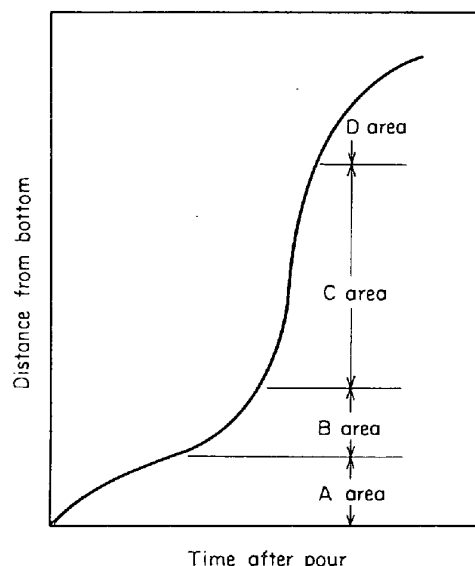


Fig. 7. Schematic solidification pattern of ingot.

状態と比較すると、その発生にはV偏析発生領域内での凝固速度に臨界値が存在し、その臨界値は、Bシリーズにおける測定結果から 65 mm/min が得られる。

以上のようにV偏析の発生する領域は押湯や端面の効果が及ばず、側面の冷却効果によつてのみ凝固する部分であり、また、その領域においてV偏析の発生する熱的条件は上下方向に温度勾配が小さく、縦方向に凝固が急速に進行することで、鋼塊の凝固パターンからつぎのように説明される。一般に鋼塊の下からの凝固速度は模式的に Fig. 7 で示される。

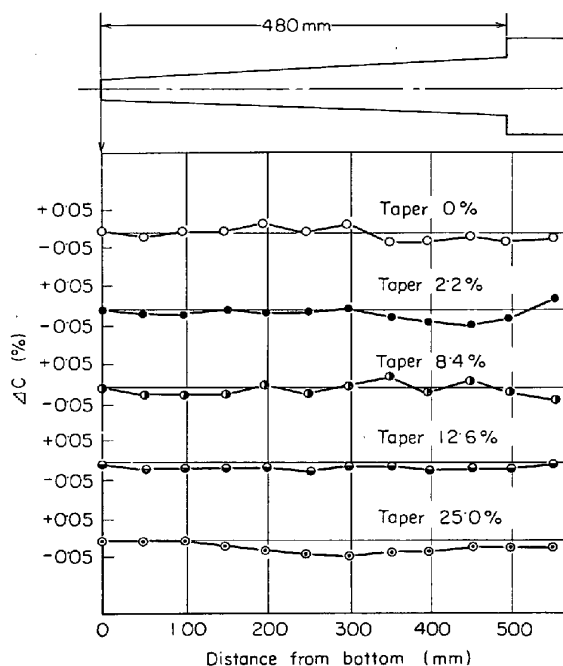


Fig. 8. Carbon distribution along the x axes of hot top ingots (C series).

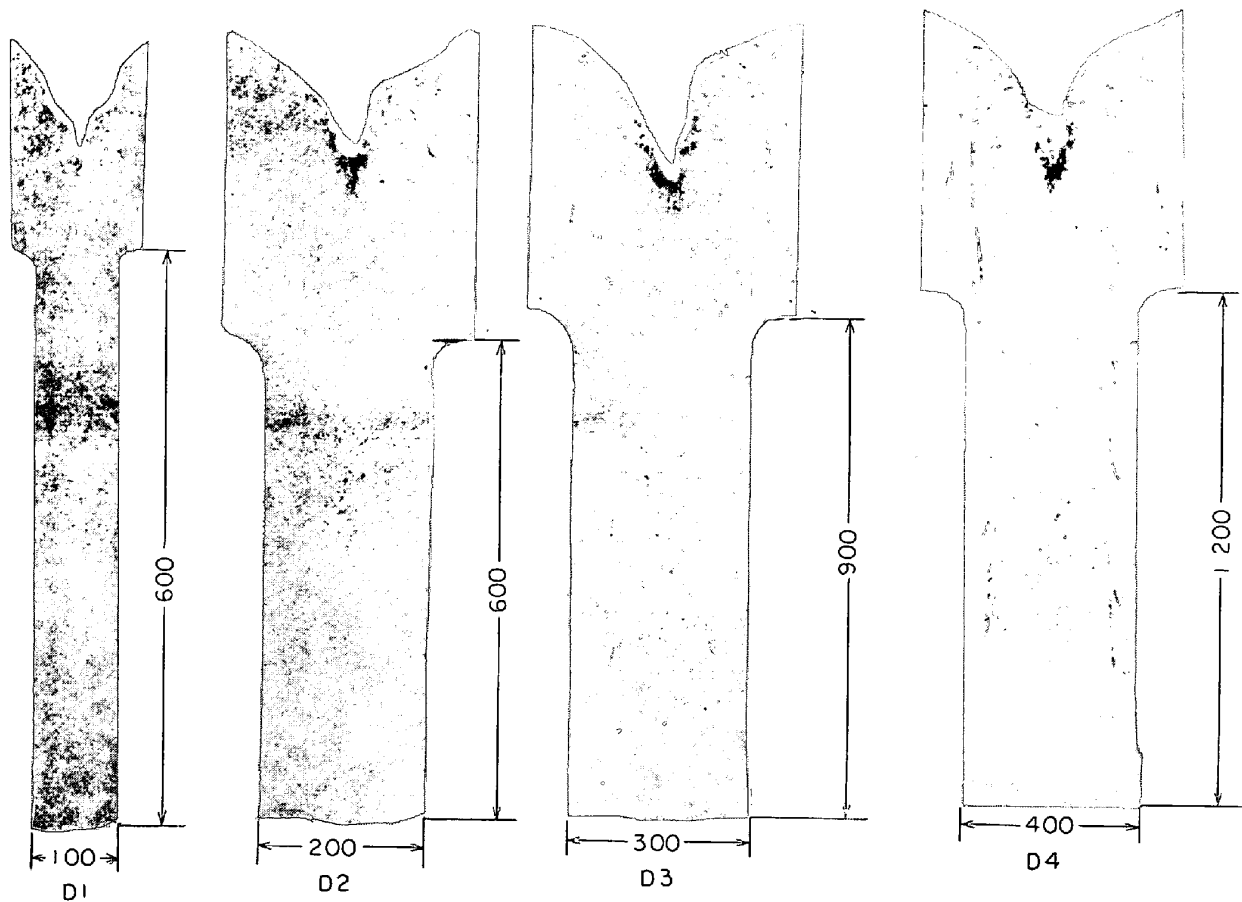


Photo. 3. Sulfurprints of ingots with various diameter (mm).

A領域：底面からの冷却効果が支配的で、その凝固速度は $D = \alpha \sqrt{T}$ (D ：凝固層の厚さ、 T ：凝固時間、 α ：定数) で律せられる。
 B領域：底面と側面からの冷却効果が重複して現われる領域。
 C領域：側面からの冷却効果によつて凝固する領域
 D領域：押湯の影響によつて凝固の遅滞する領域
 鋼塊のテーパはこの C 領域の凝固速度に影響を与え、この領域での凝固速度が大きいと V 偏析が現われ、小さいと V 偏析と水平面のなす角度が小さくなり、しかも V 偏析自体も消滅してゆく。

また、65 kg のテーパを変化させた鋼塊 (C シリーズ) のサルファープリント、マクロ組織によつて V 偏析を調べた結果、20 kg 鋼塊 (B シリーズ) と同様、テーパ量の増加に伴い V 偏析は消滅した。このようにテーパ量を増加すると、V 偏析が微弱になる現象をさらに詳しく調べるために軸心に沿つた化学成分の分布を調べた。Fig. 8 に軸心に沿つた C の分析を $\Delta C\%$ (取鍋成分分析値 - 各位置の分析値) として示す。この分布状態は V 偏析の発生状態とよく対応しており、テーパ量が少

なく V 偏析が明りように現われる鋼塊では V 偏析の発生領域で、局所的な成分偏析が多く、また $\Delta C\%$ の値は零を中心として上下にばらついた分布を示す。これに対し、テーパ量が多く V 偏析が微弱な鋼塊では、側面の冷却効果のみにより凝固する部分で、 $\Delta C\%$ は負の値をとり、なめらか分布状態を示すようになる。すなわち、テーパ量を多くすると V 偏析発生領域は濃化溶鋼が押湯へ移動しやすくなるため、負の偏析を示すものと思われる。

3.1.3 胴径の影響

高径比を 3 ないし 6 にして 1 辺の長さを 100, 200, 300 および 400 mm とした角柱状鋼塊 (D シリーズ) 縦断面のサルファープリントを Photo. 3 に示す。このサルファープリントから明らかなように、すべての鋼塊において、V 偏析は端面の冷却効果と押湯の給湯効果の及ばない部分に現われる。また、それぞれの鋼塊の V 偏析片は胴径が大きくなるにしたがつて大きくなっているが、その形状や発生状態になんらの変化も認められない。すなわち、鋼塊の V 偏析の発生は高径比が重要な因子であつて胴径の大きさは全く関係ないことを示している。

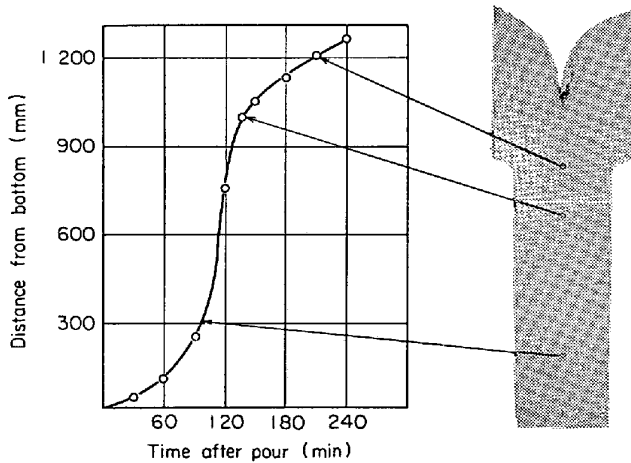


Fig. 9. Comparison between solidification rate measured by bar test and sulfurprint of 3.5 ton ingot.

また、 $400 \times 400 \times 1200$ mm の鋼塊 (D4) と同一寸法の鋼塊 (D5) で、バーテストを行ない、その結果を D4 鋼塊縦断面のサルファープリントと比較して Fig. 9 に示す。バーテストによつて得られた凝固パターンは Fig. 7 に示したものと全く同様であり、Fig. 7 に C 領域として示した部分の凝固速度はきわめて速く、しかも、この領域と V 偏析の発生領域とは一致している。

3.2 重力作用とデンドライト状態の変化

水平面と鋼塊軸心とのなす角度が 0° , 45° , 77.5° の E シリーズ鋼塊縦断面のサルファープリントを Photo. 4 に示す。

また、V 偏析の発生状態をさらに詳しく知るために Photo. 5 に 0° , 45° , 77.5° の傾斜角をもつ鋼塊のマクロ組織を拡大して示す。これらサルファープリントマクロ組織から傾斜角度が小さくなり、水平面と軸心のなす角度が零に近づくと、上面からの柱状晶の成長が顕著となり、下半部は微細な自由晶となることがわかる。また V 偏析は柱状晶帯には現われず、自由晶帯に発生している。V 偏析の V 字型は 45° , 77.5° 傾斜鋼塊および垂直鋼塊 (90° 傾斜鋼塊) では、ほぼ軸心に対称に現われ、小野寺、荒木田²⁾らの示すような重力の方向に向きを変えろという現象は認められない。さらに傾斜角度 22.5° , 0° と小さくなると V 字型は崩れ、とくに水平鋼塊 (0° 傾斜鋼塊) で明りような V 字型はなく、わずかに軸心に向かつて傾斜した偏析片や大きな偏析の粒が観察されるにすぎない。また、個々の偏析片は傾斜角が小さくなるにしたがって大型化し、さらに V 偏析の発生領域の軸心と垂直方向の幅は傾斜角が小さくなるにしたがって小さくなる。一方、Fig. 10 に水平鋼塊、 45° 傾斜鋼塊、垂直

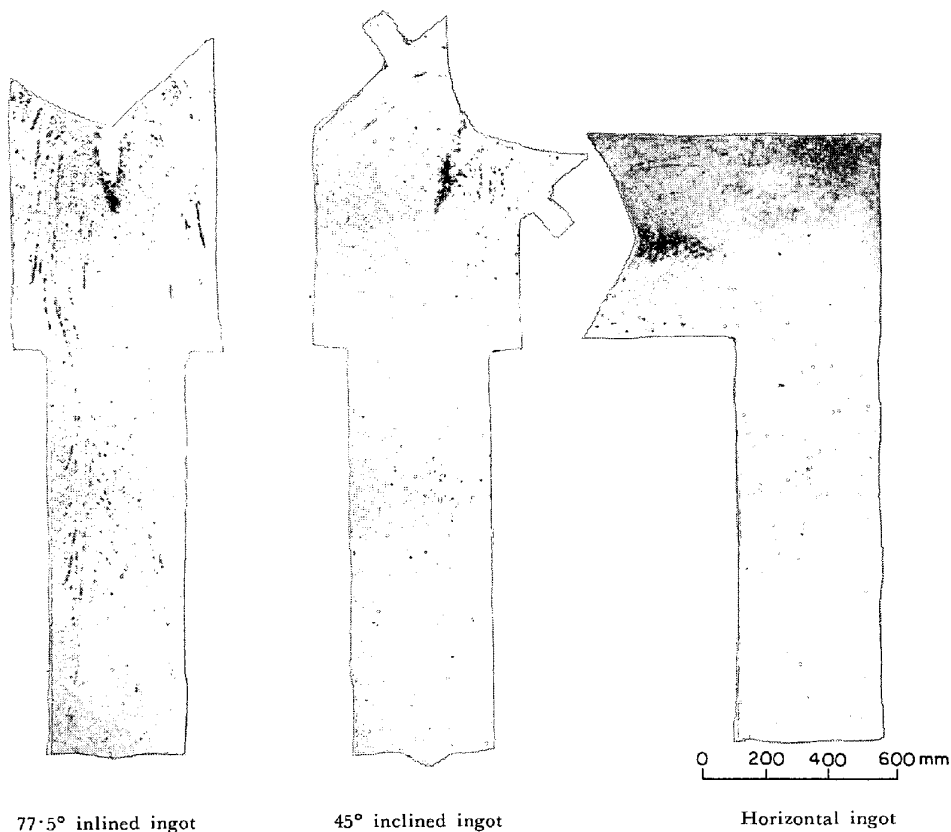


Photo. 4. Sulfurprints of inclined 3.5 t ingots.

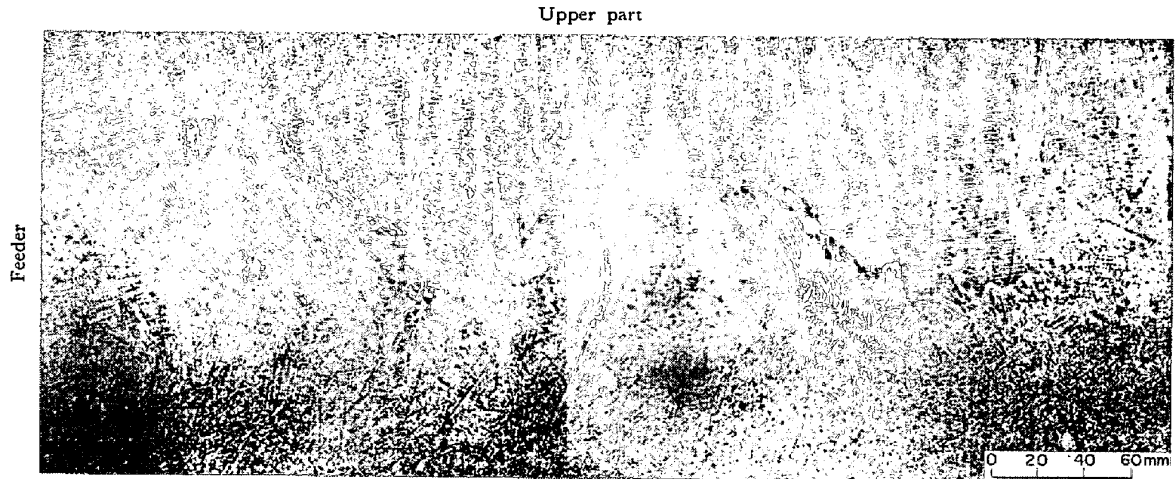


Photo. 5 a). Macrostructure of horizontal 3.5 t ingot.

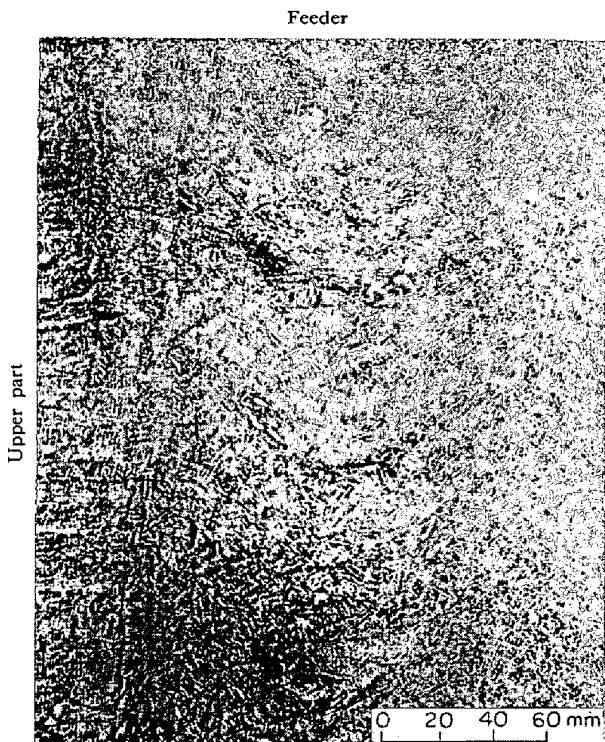


Photo. 5 b). Macrostructure of 45° inclined 3.5 t ingot.

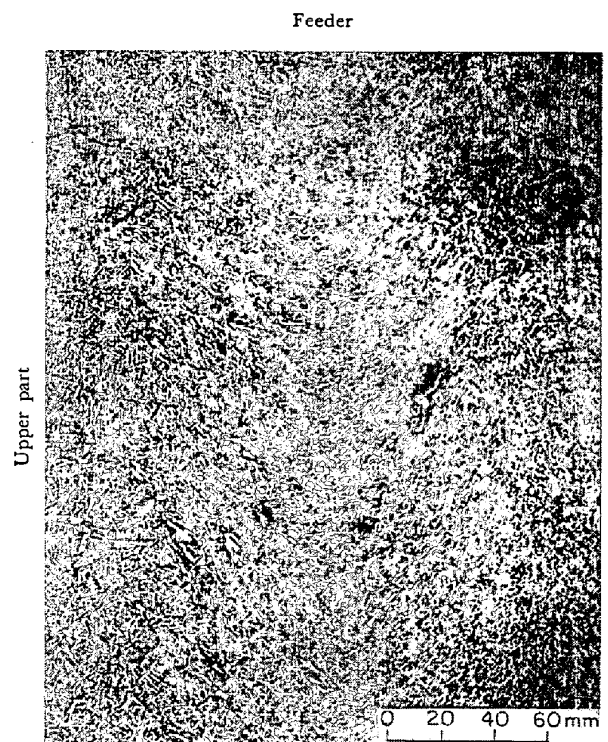


Photo. 5 c). Macrostructure of 77.5° inclined 3.5 t ingot.

鋼塊のCの分布を $\Delta C\%$ (取鍋成分分析値—各位置の分析値)の値で示す。Fig. 10より傾斜角度が小さくなるにしたがい、V偏析発生領域における濃化の程度が増加することがわかる。これをより明らかに表わすために、軸心に垂直な方向の $\Delta C\%$ の分布をFig. 11に示す。傾斜角度が小さくなるにつれ、下半部では負に偏析し、上半部では正に偏析し、軸心で最大偏析を示している。以上の結果が重力の直接的影響か、デンドライトの形態の影響かを以下に検討する。V字型の形状の変化に注目すると、45°、77.5°の傾斜鋼塊では軸心に対称に発生していることから、V字型は重力の方向に無関係であること

とが推定され、22.5°傾斜鋼塊や水平鋼塊におけるV字型の崩れはむしろデンドライト状態によると考えられる。すなわち、傾斜角度が0°、22.5°の場合では、上面からの柱状晶の成長が著しく、ほぼ、軸心までデンドライトが伸長している。V偏析が現われるためには、その部分が自由晶であることが必要で、これらの鋼塊ではその条件が満たされないためV字型が変化したものと考えられる。また、Cの分布状態に関しては明らかに重力偏析と考えられ、その分布状態は傾斜角度に依存して変化している。このCの分布とV偏析の形態を比較すると、傾斜角度が小さくなるにしたがい、軸心部でのCの

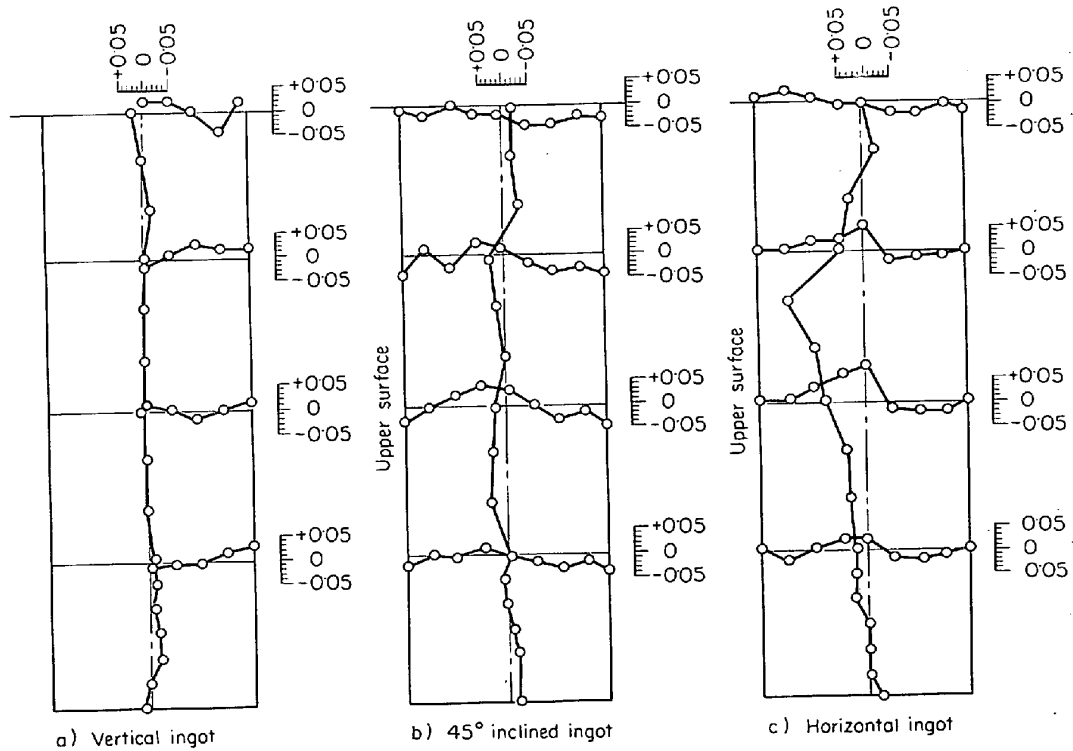


Fig. 10. Carbon distribution of inclined 3.5 ton ingots.

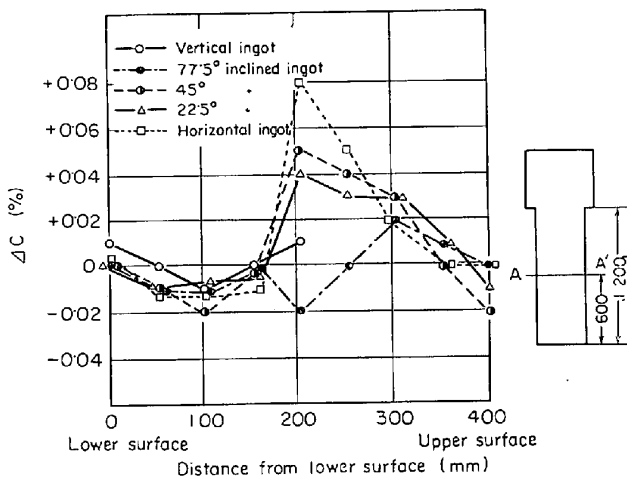


Fig. 11. C distribution of inclined ingots along AA' line.

局所的な濃化が顕著になり、それと同時にV偏析の形態も重力の影響を受けて斑点状の偏析片になる傾向が認められた。

3.3 重力作用と熱的状态の変化を組合せた場合

この鋼塊 (Fシリーズ) は重力と鋼塊軸心のなす角度を 180° とし、テーパを変えて熱的状态と重力作用とを同時に変化させた場合に、V偏析にどのように影響を及ぼすかを調べるものである。Photo. 6 にテーパを上から下に付け、押湯を下から効かせた鋼塊(下押湯鋼塊)と、上押湯鋼塊のサルファープリントを比較して示す。

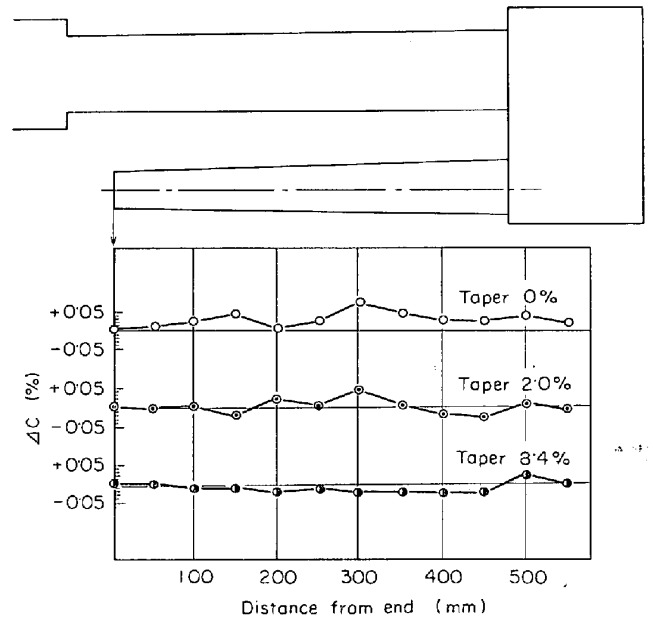


Fig. 12. Carbon distribution along the axes of hot bottom ingots. (G series)

Photo. 6 で明らかなように下押湯鋼塊のV偏析は上押湯のV偏析とは逆向きに発生している。また、V偏析とテーパ量の関係は押湯の位置に無関係であり、上押湯鋼塊でV偏析が消滅するテーパ量では下押湯鋼塊でもV偏析は消滅する。この下押湯鋼塊においては重力と鋼塊軸心となす角度は 180° で、デンドライトの状態は上押湯に比較して何ら変化していない。したがって重力が直

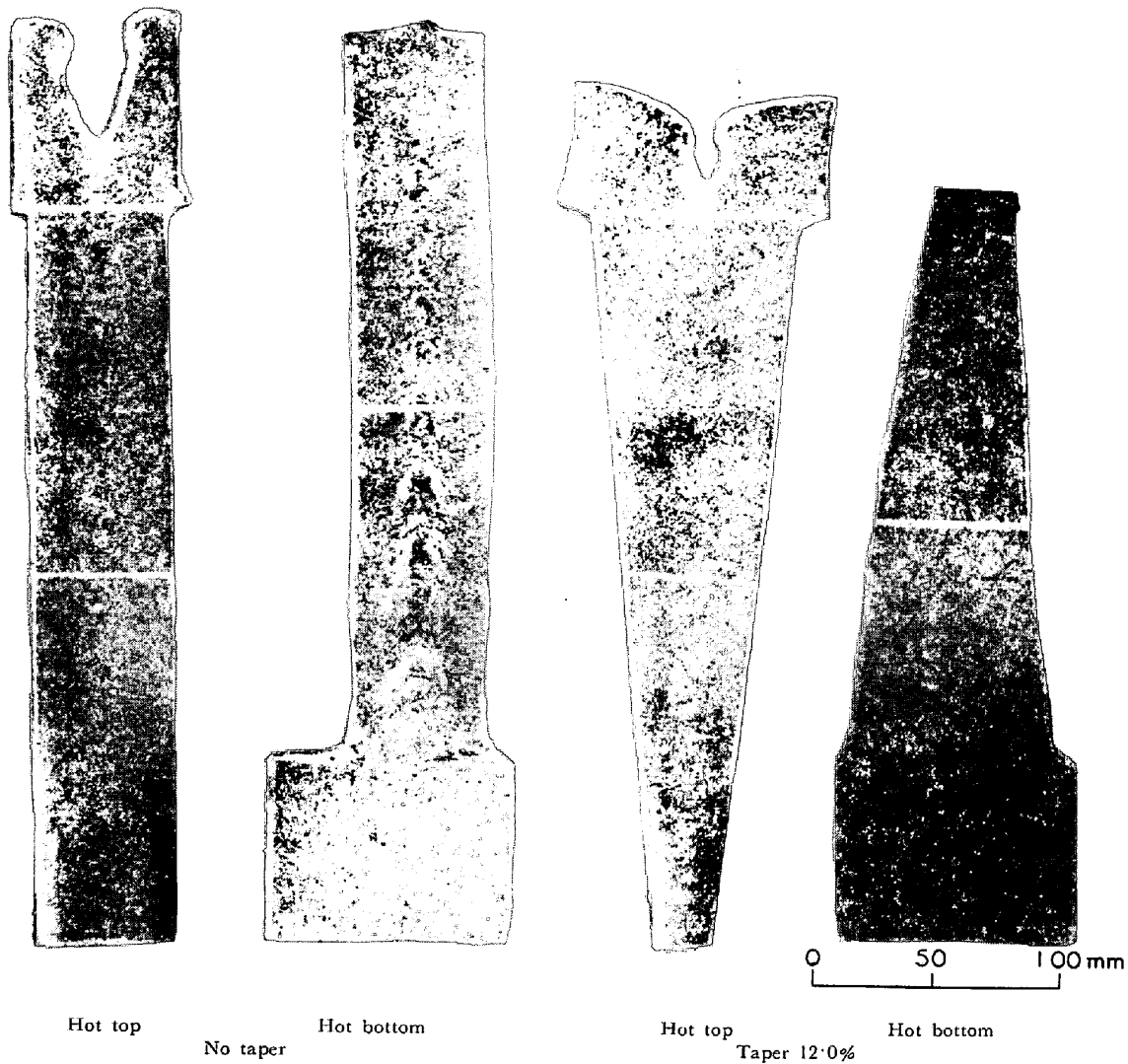


Photo. 6. Comparison between hot top and hot bottom ingots.

接V偏析の形状に影響を与えるとするならば、傾斜角度が 180° である下押湯鋼塊のV偏析の形状が最も顕著に影響を受けるはずである。しかしながら、V偏析の形状はその向く方向が逆転しているだけで、何ら変化は認められない。これは、V偏析は端面から押湯に向かってV字の開いた形状に現出し、重力は直接にV偏析の形状に関与していないことを示すものと考えられる。

つぎに $120\text{ mm } \phi \times 480\text{ mm H}$ を基本形状としてテーパーを変えた下押湯鋼塊 (Gシリーズ) の軸心に沿ったCの分布状態を Fig. 12 に $\Delta C\%$ (取鍋成分分析値一各位置の分析値) で示す。この分布状態は同じ形状の上押湯鋼塊 (Cシリーズ) とまったく同じ分布状態を示している。すなわち、テーパーの付いた領域では、そのテーパー量が少ない場合、局所的な偏析があり、 $\Delta C\%$ の値が零を中心にして上下にばらついた分布を示すが、テーパー量が多くなると、 $\Delta C\%$ の値は負の値とな

り、なめらかな分布状態を示すようになる。

以上のようにV偏析の発生状態も化学成分の分布状態も、下押湯鋼塊と上押湯鋼塊の間に差異のないことが明らかとなった。テーパーの付いた部分の化学成分の分析値が取鍋成分の分析値と比較し、負の値を示すことは、テーパーのない場合存在すべき濃化溶鋼が、その部分から押湯の方向へ移動したことを意味する。この現象は下押湯鋼塊も上押湯鋼塊も同様であるので、濃化溶鋼の移動は従来からいわれているような浮上だけではないものと思われる。

下押湯鋼塊でテーパーの付いた部分から押湯へ濃化溶鋼が移動したとすると、その移動する途中で障害物を挿入すれば、その移動を実証することができるものと考えられる。Photo. 7にその障害物として石英管をもちいた下押湯鋼塊 (H) の縦断面のサルファープリントを示す。Photo. 7から明らかのように、石英管内には偏析片が

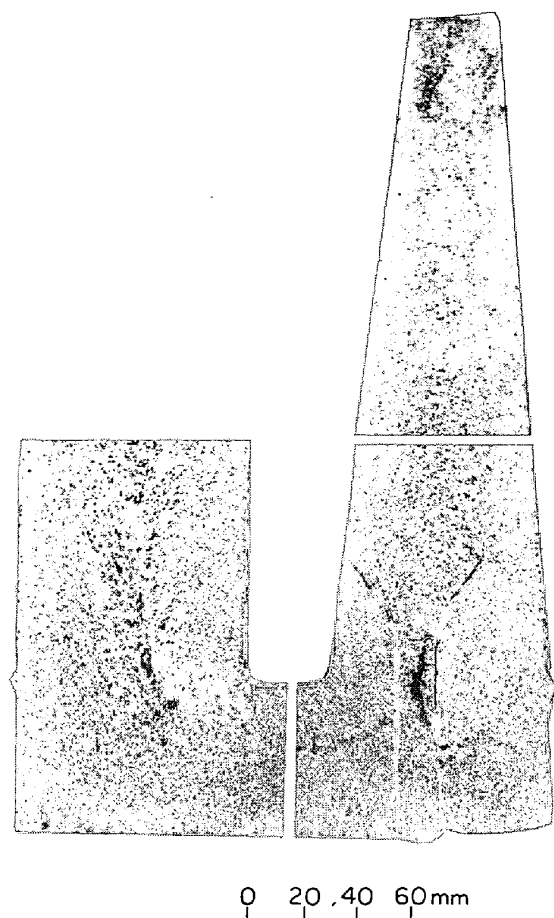


Photo. 7. Sulfurprint of hot bottom ingot with silica tube.

存在しており、さらに下部の小孔の付近では石英管の外部にも偏析片が存在している。石英管上端は、扇状に開放しているので、テーパの付いた部分への給湯は、下部の小孔から石英管を通して行なわれたものと思われる。その給湯のチャンネルに相当する石英管内にも偏析片が存在するという事は、凝固の進行にともなうテーパの付いた部分の濃化溶鋼は、給湯方向とは逆の方向に移動したことを意味するものである。すなわち、テーパ量の少ない場合にV偏析片として鋼塊内に固定される濃化溶鋼は、テーパ量の多い鋼塊においては、重力とは全く無関係に凝固進行方向へ、給湯の方向とは逆の方向に移動している。

3.4 小括

以上の試験結果を要約するとつぎのとおりである。

1) V偏析の発生する鋼塊はテーパがなく、高径比の大きなものに限られる。そのような鋼塊の中でのV偏析の発生領域は、側面の冷却効果によつてのみ凝固が進行する領域で、縦方向の凝固でみれば加速凝固領域に相当する。その場合、凝固時間の長短はV偏析の発生に無

関係である。

2) 重力のV偏析に及ぼす影響を調べた結果では、重力はV偏析の発生に直接影響を与えることはない。

3) V偏析はデンドライトの状態に強い影響を受け、柱状晶帯には発生せず自由晶帯にのみ発生する。

4) テーパー量を多くすると濃化溶鋼は、重力の方向と無関係に凝固の進行方向に排出される。

4. 従来のV偏析の生成機構に関する理論の問題点とその検討

従来のV偏析の生成機構に関する理論はつぎの3種類に大別される。すなわち、1) 結晶沈殿を主体とするもの、2) 濃化溶鋼の移動と凝固層による捕捉、3) 最終凝固時のサクション、などである。これらの理論の概要とその問題点について述べ、どの理論が最もよく試験結果を説明するかを検討する。

4.1 結晶沈殿を主体とする理論

この理論にはさらに2種類の理論があり、一方はGRAY³⁾に代表されるもので、他方は河合⁴⁾に代表されるものである。

GRAY³⁾は種々の押湯条件を有する6 in ϕ \times 30 inの7本の鋼塊の内部性状と凝固組織を観察した結果、鋼塊内の熱対流によつて凝固前面に存在する結晶が運ばれ、それが堆積して自由晶が生成することを推定し、V偏析発生領域における自由晶の状態からV偏析の生成機構を推定している。その説明によると「鋼塊内の熱対流により結晶が鋼塊側面に堆積し、それが周期的に崩れて凝固層とその崩れた結晶の間に液体をはさみ、それが後に濃化してV偏析になる」としている。特にV偏析は自由晶帯にあることに注目すべきであるとしている。

一方、河合⁴⁾は鋼塊のマクロ組織を観察して「鋼塊内では結晶沈殿が起き、そのために自由晶帯ではクサビ型の凝固前面をなす。凝固過程のある時期において鋼塊内温度分布と凝固温度分布の差によりブリッジング現象がおこり、濃化溶鋼が捕捉されV偏析ができる」としている。この理論での疑問点は、結晶沈殿や鋼塊内対流で結晶が運ばれるという現象が起きているとしても、ブリッジング現象や、堆積した結晶の崩壊現象が実際に起きているか否かの実証性に欠ける点にある。この問題に関しては傾斜鋼塊と下押湯鋼塊に現われた現象を検討すれば明らかとなる。すなわち、結晶の沈殿によつてV字型の凝固前面が生成するのであれば、V偏析の形状は当然のことながら傾斜角度に大きく依存し、77.5°、45°傾斜鋼塊において軸心に対称にV偏析が発生するという現象は起きえないはずである。また堆積した結晶の崩壊やブ

リッジング現象が起きるとすれば下押湯鋼塊でテーパのない場合に、V偏析は上に開いた形で発生するはずである。以上のことから結晶の沈殿を主体とした理論でV偏析の生成を説明することは不可能と考えられる。

4.2 濃化溶鋼の移動と凝固層による濃化溶鋼の捕捉を主体とする理論

この説は小野寺、荒木田²⁾らによつて提出されたものである。垂直に置いた砂型に溶鋼を鑄込み、これを凝固過程中に傾斜させ、偏析帯の状態が重力の作用によつて変化することを示し、またバーテストによつて凝固の進行状態を調べるとともに、バーテストの棒に付着した溶鋼の化学成分を分析して凝固過程における鋼塊内の濃度分布を調べてV偏析の生成機構をつぎのように説明している。「凝固前面には上向きの濃度勾配が生じ、凝固が進行するにつれて濃化溶鋼は増加し、上方への物質移動ができなくなつて、凝固層の中に捕捉され、これがV偏析になる」としている。また「V偏析のV字型は最初から凝固界面の形状に近く、U字形ないしV字型としてすでに存在した濃縮体が固定される」としているが、この理論に対しては次のように考えられる。V偏析はすでに述べたように、縦方向の温度勾配がきわめて小さい領域に現われる。V偏析の発生時期には当然のことながら鋼塊軸心まで固相が成長した状態であると考えられる。このように縦方向の温度勾配が小さく固相と液相の混合した状態の中で、この理論で説明するようなV字型もしくはU字型の凝固前面は存在しえないと考えられる。すなわち固液共存層の中で凝固前面とは何を示すものが不明であること、また明確な凝固前面が存在することと温度勾配がないことは互いに相反する問題であるためである。さらに濃化溶鋼の凝固前面への出現にしても、V偏析の発生領域は側面の冷却によつて凝固する領域であり、濃化溶鋼は凝固進行とともにV偏析発生領域全般にわたつて現われるもので、この理論で説明するような“凝固前面”にのみ出現するものではない。以上のように、この説ではV偏析の発生する熱的条件と固液共存層を考慮していないので、実際の凝固過程における現象を説明することができない。

4.3 最終凝固時のサクシオンを主体とした理論

この説は最も古くから存在するもので、中心部の凝固の際に下部の凝固収縮を補うために上方から溶鋼を吸い込み、凝固する際にV偏析が生成するという理論である。英国鉄鋼協会偏析小委員会³⁾によると「凝固の進行によつて濃化溶鋼(母液に対して非混合)は浮上する。凝固速度が遅くなると晶出する固体と液体の濃度差が増加し濃化溶鋼は浮上しやすくなる。凝固のある段階に致ると

濃化溶鋼の粘性が大きくなり、その浮上性は低下する。他方頭部に残つた溶鋼は残存する液体の小さなチャンネルを通つて凝固収縮を補うために引つぱられ、そのとき同時に濃化溶鋼を引つぱつてV偏析をつくる」としている。また、蒔田は鋼塊マクロ組織の観察と鋼塊内の温度分布の検討から「鋼塊中心はほぼ同一時期に凝固する。その順序はまず1つの液面が下部の凝固収縮を補うために順次陥没し、V字型になつて内側にわずかな液体を残す状態となる。この状態でなお収縮が止まず上方からの給湯がない場合はV字型に沿つて組織がゆるみ開かれる。このときに残存した濃化溶鋼が流れ込んでゴーストラインとなり、残液不足の場合には空隙となる」と説明している。HULTGREN⁷⁾の説明も蒔田⁶⁾とほぼ同じである。

サクシオンの具体的なプロセスについては、理論の提出者によつて差があり、また固液共存層が考慮されていないためにここではサクシオンを凝固収縮を補うための急速な給湯と解釈し、従来の理論にこだわらずに以下検討することとする。V偏析が発生する縦方向に温度勾配の小さな領域では縦方向に急速に凝固する。これを給湯から考えると、この部分の凝固進行が速いために急速に給湯する必要がある。すなわち加速凝固領域とはサクシオンが強く働く領域に相当し、V偏析の現われる熱的条件をよく説明することができる。またテーパ量が増加してV偏析が消えるのは、加速凝固が弱められてサクシオンが働かなくなるためと考えられる。さらにV字型の向く方向はサクシオンの方向によつて決定され、溶鋼が流れてくる方向にV字が開いて現われる。すなわち下押湯鋼塊でV字の形状が下に開いているのは、サクシオンが下から上に向かつておきるためと考えられる。とくに下押湯鋼塊でテーパのない場合では、V偏析発生領域には熱的に上下方向に何ら方向性がないのにもかかわらず押湯の位置のみでV偏析の方向が変化する現象は、押湯の位置による方向性、すなわち給湯する溶鋼の流れる方向がV偏析の形状を決める支配的因子であることを強く示しているものである。一方サクシオンの強さは鋼塊の冷却条件によつて決まるので、テーパ量とV偏析の強さの関係は押湯の付く位置に無関係である。

また、傾斜鋼塊に起きる現象をサクシオンを考慮すれば、つぎのように解釈される。傾斜鋼塊は押湯を除いて同一形状であるので、内部のデンドライト状態や化学成分の分布が同じなら、サクシオンはすべての鋼塊に同程度に作用しているはずである。それゆえ垂直鋼塊に比べてデンドライトの形態があまり変化せず、また重力による化学成分の分布状態の変化もあまり認められない77.5°、45°傾斜鋼塊では、V偏析は鋼塊軸心に対称に発生して

いる。これに対し、 22.5° 傾斜鋼塊や水平鋼塊では上面からの柱状晶の成長が著しいためにサクシオンは妨害されて弱くなり、また軸心部が強く濃化しているため垂直鋼塊ならば完全に凝固している温度でも未凝固の状態になっており、サクシオン作用が垂直鋼塊と大幅に異なるという2つの原因のためにV偏析の形状が変化すると解釈される。

以上のように、サクシオンを考慮すれば、中心部に偏析がV字型に現われる現象に関して、得られた試験結果をすべて矛盾なく説明できる。また上押湯鋼塊や下押湯鋼塊の化学成分の分布状態と下部に石英管を挿入した下押湯鋼塊のサルファープリントの観察結果より、テーパー量を多くするとV偏析となるべき濃化溶鋼がテーパーの付いた部分から押湯へと排出されることが明らかである。これはサクシオンがV偏析のV字型に関する問題であるのに対し、濃化溶鋼の動きを示すものである。すなわちテーパーを付けるとサクシオン効果が弱くなり、V字型も偏平なU字型に変化して偏析片が微小となり、V偏析となるべき濃化液が押湯へと排出されるものと考えられる。しかしながら、サクシオンと濃化溶鋼の移動の関連性が十分に明らかになつておらず、またV偏析片となるべき濃化溶鋼がどのようにして均一にデンドライト樹間に分散した状態からある程度の周期性をもつて出現するかについても不明な点が残つており、今後サクシオンの具体的プロセスを明らかにしてゆくとともに、これらの点も解明しなければならない。

5. 結 言

これまでのV偏析の生成機構に関する多くの研究からV偏析は1) 熱的状态、2) 重力作用、3) デンドライトの状態の3つの因子により発生するものと考えられる。したがって、おのおのの因子を個々にあるいは組み合わせて変化させた場合に、V偏析がどのような影響を受けるかを観察することによりV偏析の発生条件を調べた。その結果はつぎの通りである。

1) V偏析はテーパー量が小さく、高径比の大きい鋼塊に発生する。その鋼塊の中でV偏析は端面効果と押湯効果の及ばない加速凝固領域に発生する。

2) 重力はV偏析に直接影響を及ぼすことなく、むしろ

重力によつて引き起こされるデンドライト状態の変化や化学成分の分布状態によつてその形状が変化する。

3) V偏析はテーパー量が多くなると消滅する。この場合にV偏析片となるべき濃化溶鋼は凝固の進行とともにテーパーの付いた部分から押湯へと排出される。

これらの結果に基づいてV字型に偏析片が現われる現象に注目してV偏析の生成機構を考察した結果、これまで提出された理論の中でサクシオンがV偏析を発生させる支配的因子であるとする理論でこれまでの実験結果をよく説明することができた。しかしながら、濃化溶鋼の動きやサクシオンの具体的プロセス、ある程度の周期性をもつて偏析片の現出する機構については不明な点が多く今後さらに明らかにしてゆく必要がある。

終わりに臨み、本研究の発表を許可された株式会社日本製鋼所常務取締役室蘭製作所長館野万吉博士に深謝するとともに、種々ご助言とご指導を賜わつた室蘭製作所研究所長前川静弥博士ならびに直接試験を遂行された同研究所寺島栄作、山田人久両氏に深堪なる謝意を表す。

文 献

- 1) E. MARBURG: J. Metals, 5(1953), p. 152
- 2) 小野寺, 荒木田: 鉄と鋼, 45(1959), p. 16
- 3) B. GRAY: JISI, 182(1956), p. 366
- 4) 河合: 鉄と鋼, 43(1957), p. 431, p. 528
- 5) Report on Heterogeneity of Steel Ingots: JISI, 113(1926), p. 39
- 6) 蒔田: 鉄と鋼, 13(1927), p. 1001
- 7) A. HULTGREN: JISI, 120(1929), p. 69

討 論

【質問】 三菱製鋼(株)技術部 竹下勝人

サクシオンの意味についてご教示いただきたい。Feedがないと意味がないと思われるが？

あるいはFeedが連続して存在する必要がある。

【回答】 サクシオンとは給湯の一種であるが、柱状晶帯などにおける給湯とは異なつて加速凝固領域で行なわれるので給湯が急速に行なわれるためにサクシオンと称している。本研究ではサクシオンの具体的プロセスにはふれず、単に最終凝固時の凝固収縮を補うための給湯として扱っているが、この具体的なプロセスはまだ明らかになつていない。ただしサクシオンが通常の給湯と異なる点は、1) 温度勾配のない方向に行なわれる。2) 固相率の高い状態で行なわれる。という2点であり、このような状態で行なわれる給湯はどのようなものか今後実験的に明らかにしてゆく予定である。