

と。

- (iii) ガス採取の位置を炉心と炉壁に限らずその中間部分にても採取すること。

等幾多の興味深い試験が考えられる。

また炉況の変動に応じて希望する時に直ちに実験を行い得ることもきわめて望ましい。なお炉況との関係をさらに追求し実際作業に応用するには、何をおいてもまず実験装置ならびに方法を簡易化して手軽におこなえることが必要であり、そのためには直接ガス中のラドンの放射能を記録できるような連続測定の方法も検討されなければならない。それらについてはさらに研究を続け熔鋳炉々内ガス分布の解明に役立たしめたいと念願している次第である。

#### IV. 結 言

上述せるごとく著者等は追跡子として  $0.6\text{mC}$  という少量のラドンを使用し, pulsed ionization chamber による測定方法の採用によつてきわめて効率良く炉内ガス通過時間を測定することに成功した。実際に稼動している 1,000 t 熔鋳炉において 3 カ月にわたり 40 回のラドンの発射をおこなつて炉内ガス通過時間のみならず, 炉心と炉壁とにおけるガス分布状況や炉況との関係, あるいはまた出滓作業や出鉄作業によるガスの流れの変動などについて考察した。もちろんまだ実験回数が少く結論を得るに至っていないが, とも角次第に脚光を浴びつゝある放射性同位元素を 1,000 t 熔鋳炉に利用し, 熔鋳

炉内のガス分布の変動状態をある程度推察することができ, また炉況との関連性についても一つの傾向が認められ炉況診断の手がかりを得ることができたと考えるので今後さらに研究を続けていく考えである。小さな針程の金管に封入されたラドンによつて  $1,200\text{m}^3$  をこえる巨大な熔鋳炉内のガスの流れを把握できるということは今更のごとく放射能の偉力を思い知らされる感が深い。

最終に本実験は終始京都大学理学部木村毅一教授ならびに同研究室隈部, 三宅, 小方の諸氏の直接の御指導と御協力によつたものであり, また大阪大学医学部山口寿教授ならびに神戸工業原子力部押田正部長にはラドンの分譲や測定装置について御協力を賜つたものであることを附記して深甚の感謝を献げる次第である。

(昭和 33 年 5 月寄稿)

#### 文 献

- 1) S. P. Kinney: Bureau of Mines, Technical Paper 442 (1929)
- 2) 芹沢正雄, 高橋愛和, 神原健二郎: 鉄と鋼, 43 (1957) 270
- 3) National Bureau of Standards, U.S. Handbook 52 (1953)
- 4) E. W. Voice: Jour. of Iron & Steel Inst., 163 (1949) 312  
" 166 (1950) 315
- 5) E. W. Voice: Steel., 129, Sep. 10 (1951) 102

## 砂型鑄造, 傾斜凝固鋼塊におけるマクロ偏析の挙動\*

(大型鋼塊の凝固および偏析に関する研究—III)

守川平四郎\*\*・小野寺真作\*\*\*・荒木田豊\*\*\*

### BEHAVIORS OF MACRO-SEGREGATES IN THE SAND CAST INGOTS SOLIDIFIED WITH THEIR AXIS INCLINED

(Studies on the Solidification and Segregation of Larger Steel Ingots—III)

Heishiro Morikawa, Shinsaku Onodera and Yutaka Arakida

#### Synopsis:

In the 2nd Report, the effect of gravity on the vertical segregation proceeding in the melt of solidifying core of ingots has been indicated from a new standpoint.

\* 昭和 32 年 10 月本会演説大会 (戸畑) にて発表

\*\* 日本製鋼所室蘭製作所製鋼部製鋼課長 \*\*\* 同 研究部第 2 課

To know this phenomenon more explicitly, four ingots weighing 4.9 tons with round section were cast in sand moulds (Fig. 1), and the moulds were held either vertically or inclinedly, otherwise alternately inclined and re-erected, during solidification.

Investigations on these ingots (Fig. 3~8) revealed the following facts:

1) The V-segregates are formed even in the zone of negative segregation, confirming some of the previous views.

2) The "germs" of V-segregates are already formed in the solidifying melt, which are fixed as V-segregates when the solid-liquid interface passes them. At some stage of solidification, they can move independently of the growing crystals.

3) When a solidifying ingot is inclined ( $22\sim 25^\circ$  in this experiment), the germs of V-segregates in the melt move towards the direction of the new perpendicular. While, when the ingot is solidified inclinedly from right after the pour, the V-segregates disappear within the half of lower level of gravity.

These show that the effect of gravity on the formation of V-segregates is very conspicuous and delicate.

4) The effect of inclination is also notable for inverse V-segregates.

5) Convection in the solidifying melt seems to be negligible.

## I. 緒 言

前報<sup>1)</sup>では, bar test の際に bar に附着凝固する熔鋼の分析によつて見出された. 鋼塊軸心部で凝固しつつあるメルト内での垂直方向偏析の進行過程について報告し, これが重力の作用によつて生ずるものであることを推論した. この点をさらに究明するために, 本報では, 凝固中の鋼塊を傾斜して重力の作用の方向を相対的に変化せしめる実験をおこない, 逆V偏析およびV偏析におよぼす重力の影響凝固の進行と偏析の形成との関係, 凝固しつつあるメルト内での対流などについて見出された新しい事実について報告する.

## II. 実験方法

実際の鋼塊内に生ずる偏析, とくに逆V偏析およびV偏析を対象とする研究では, 十数トン以上の大きさの鋼塊による実験調査を考えねばならないが, 研究費と研究に要する時間がまず問題であるほかに, ここに報告せんとする実験ではさらに

- 1) 傾斜作業は安全, 確実, 容易におこない得ること.
- 2) 傾斜角度をあまり大きくしなくても(鑄型+鋼塊)が安定に摺坐し得ること.

の2条件が加わる.

一般に砂型鑄造鋼塊では, 凝固速度が小さいためにさほど大型の鋼塊でなくても逆V偏析およびV偏析が顕著に現われることは周知の事実であるが, 試みに Fig. 1のごとき約 4.9 t の円型鋼塊を砂型に鑄込んで軸心沿いに bar test して見たところ, 本体(押湯下まで)凝固所要時間は約 5 時間 15 分で, 金型鑄造の  $22\sim 25^\circ$  8 角

鋼塊に匹敵する<sup>2)</sup>ことが知られ, さらにその逆V偏析線は鋼塊表面より 50~70 mm の深さに始つて濃く現われまたV偏析は逆V偏析帯の間に(縦断面にて)大きく明瞭に見られて後に示すごとく研究の目的に対してはなほだ有用であると考えられたので, この鋼塊によつて実験をおこなうこととした.

鑄型(乾燥砂型)は鑄鋼ロール製作用の枠内に作り, 下注ぎ鑄込みし

た. (鑄型+鋼塊)の重心を通る鉛直線は約  $17^\circ$  の傾斜によつて安定圏外に出るので, 傾斜は  $22\sim 25^\circ$  を目標としておこなつた. 4本の供試鋼塊は  $0.2\sim 0.4\%$  炭素鋼で, その造塊記録の一部を Table 1 に示す.

傾斜はつぎのごとくにおこなつた.

鋼塊 No. 1: 垂直鑄込, 垂直凝固. (比較の基準)

鋼塊 No. 2: 垂直鑄込の後

44分で……第1回傾斜(約  $19^\circ$ )

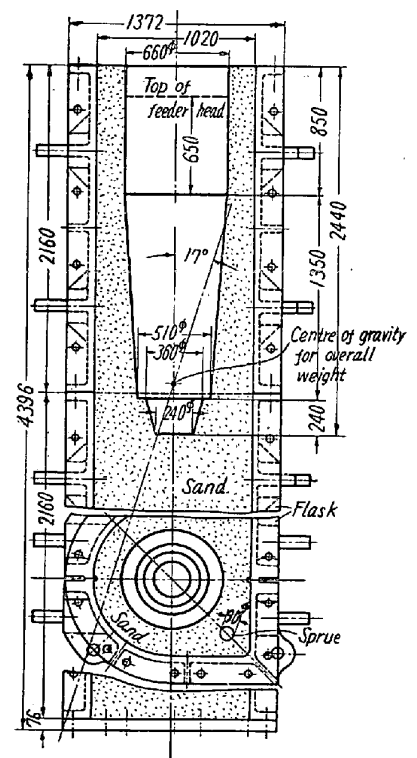


Fig. 1. Sand mould for test ingots.

Table 1. Casting record of test ingots.

		Number of ingots			
		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Chemical composition [%]	C	0.38	0.20	0.30	0.23
	Si	0.27	0.22	0.35	0.37
	Mn	0.55	0.45	0.68	0.62
	P	0.028	0.025	0.024	0.023
	S	0.032	0.028	0.037	0.011
	Ni	0.11	0.20	0.09	0.18
	Cr	0.14	0.06	0.05	0.14
	Cu	0.15	0.19	0.25	0.22
	Mo	0.02	tr.	0.02	0.05
Tapping temp., [°C]		1630 (Imm.)*)	1630 (Imm.)*)	1630 (Imm.)*)	1668 (Imm.)*)
Casting temp. (feeder head), [°C]		1529 (Imm.)*)	1525 (Imm.)*)	***)	1530 (Opt.**) )
Casting rate, [mn]		4'—00''	3'—05''	***)	***)
Time of solidification for the ingot body, [h]		.5°—15'	4°—30'	***)	***)
Conditions of solidification		Cast & solidified vertically.	Cast vertically. After 44mn. Inclined (1st time) After 38mn more. Reerected (1st time) After 31mn more. Inclined (2nd time) After 38mn more. Reerected (2nd time) After 37mn more. Inclined (3rd time) Then left to complete solidification.	Cast vertically. After 3h passed. Inclined and left to complete solidification.	Cast vertically. After 34mn passed. Inclined and left to complete solidification.

\*) Immersion pyrometer \*\*\*) Optical pyrometer \*\*\*\*) Not measured.

さらに38分で……第1回復元(垂直に)  
 さらに31分で……第2回傾斜(約22°)  
 さらに38分で……〃〃〃復元  
 さらに37分で……第3回傾斜(約22°), そのまゝ凝固完了.

鋼塊 No. 3: 垂直鑄込後3時間経過して傾斜(約22°), そのまゝ凝固完了.

鋼塊 No. 4: 垂直鑄込後34分で傾斜(約25°), そのまゝ凝固完了.

傾斜は鑄型をピットの側壁, 他の大型鋼塊あるいは鋼塊鑄型にもたせかけることによつておこなつた. Fig. 2は鑄型をピットの中に傾斜安定せしめた状況を示す.

各鋼塊は凝固型こわしの後, 傾斜時の鋼塊の軸心線をふくむ鉛直面で縦割りして切断面をハール・バイト仕上

げ, バフ研磨し, 後この仕上面のサルファー・プリント採取および塩化銅アンモン法によるマクロ腐蝕をおこなつた. マクロ腐蝕像はそのまゝ写真撮影するとともに, 現出された粗大1次晶粒界を示すフェライト網目に沿つてトレーシング・ペーパーによる筆写をおこない, これを白紙上に置いて写真撮影した. また鋼塊縦断面の一部から3~6mmφのドリルによつて3g程度の試料を採取しCおよびSの偏析を化学分析によつて調査した.

なお鋼塊 No. 1~No. 3の凝固に際して砂型内部の数カ所の温度変化を測定し, たとえば鋼塊表面から25mm離れた箇所の温度は, 鑄込後約1時間から約13時間までの間1000~1200°Cに達していることが知られた.

### III. 実験結果とその考察

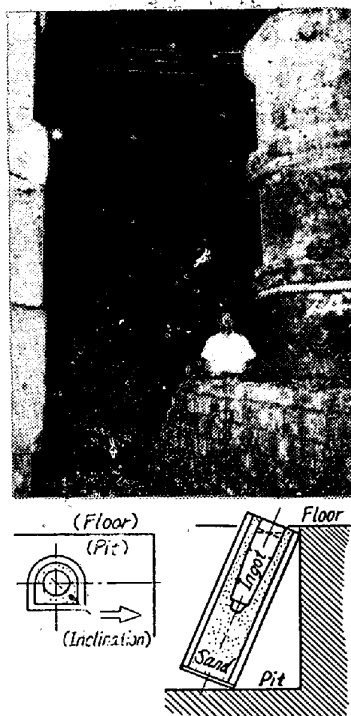


Fig. 2. Mould inclined in the pit, with an ingot poured in it.

とき1次晶粒界の筆写のみを掲げた。この1次晶には、長径10cmを越す巨大な粒界(鋼塊No.1, 下半部軸心)など、二、三の注目すべき点もあるが、本研究に直接の

i) 実験結果

実験結果を Fig. 3~8 によつて示す。Fig. 3 および Fig. 4 は4本の試験鋼塊のサルファー・プリントとマクロ腐蝕像の全体を示し、Fig. 5, 6 および7 はそれぞれ鋼塊 No. 2, No. 3 および No. 4 のサルファー・プリントの主要部を schematic に画いたものである。Fig. 8 は鋼塊 No. 2 および No. 4 の縦断面に沿つたCおよびSの分布を示す。

Fig. 3 および Fig. 4 のマクロ腐蝕像は、現在の本誌における印刷効果を考慮して、前述のごと

関連が少いので論述を省略し、後述のごとく、凝固の進行の軸対称性のみを確認するに止める。Fig. 3 および Fig. 4 の軸心線上の中空丸印は bar test した位置を示し前後数分の差でそれぞれ傾斜または復元した。

Fig. 8 の分析結果を Fig. 3 および Fig. 4 のサルファー・プリントと対照すると、V偏析が逆偏析域内にも形成されているのが分る。このことは従来必ずしも明確には認識されていなかつたようであるが、第IV報でマクロ偏析の成因を総合的に考える際にきわめて重要な点であるので、再確認しておく。逆偏析域は、鋼塊本体高さ1590mmの内、底端から1000~1300mmの高さまで達している。鋼塊No.2では軸心に直角な方向のSの分布に、Fig.3のサルファー・プリントに明確に対応する凹凸は認められないが、これには分析試料の採取量硫化物の存在状態なども関係すると考えられる。鋼塊No.4では、Fig.8はFig.4の濃淡にほぼ対応しているといえる。

ii) 鋼塊 No. 2 についての観察

Fig. 5 を中心として鋼塊 No. 2 を観察すると、

1) 軸心部は第3回傾斜の高さまで逆偏析域に入っているが(Fig.8)サルファー・プリントでは、第1回復元後第2回傾斜をおこなうまでの間にV偏析の淡い痕跡がすでに生じている。

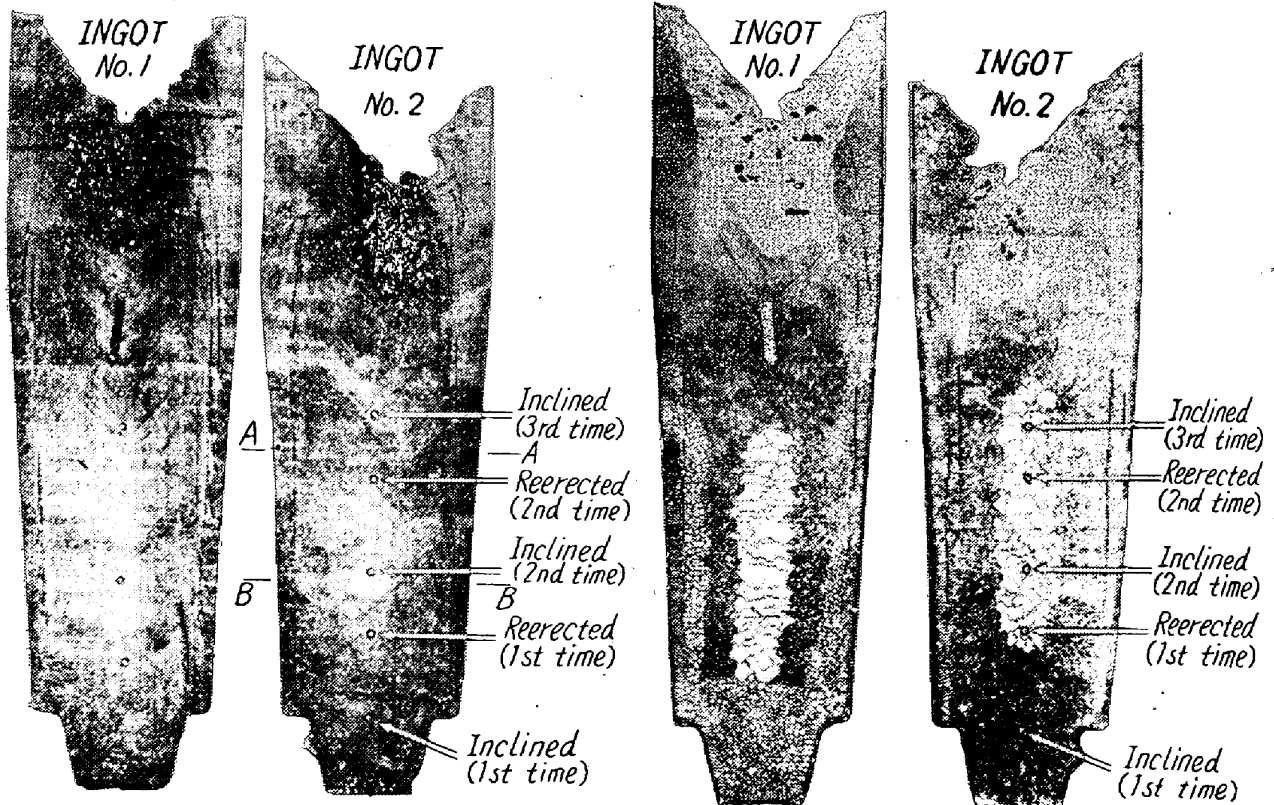


Fig. 3. Sulphur print and macro-etching of ingots No. 1 and No. 2. (Sections A-A and B-B; refer to Fig. 8)

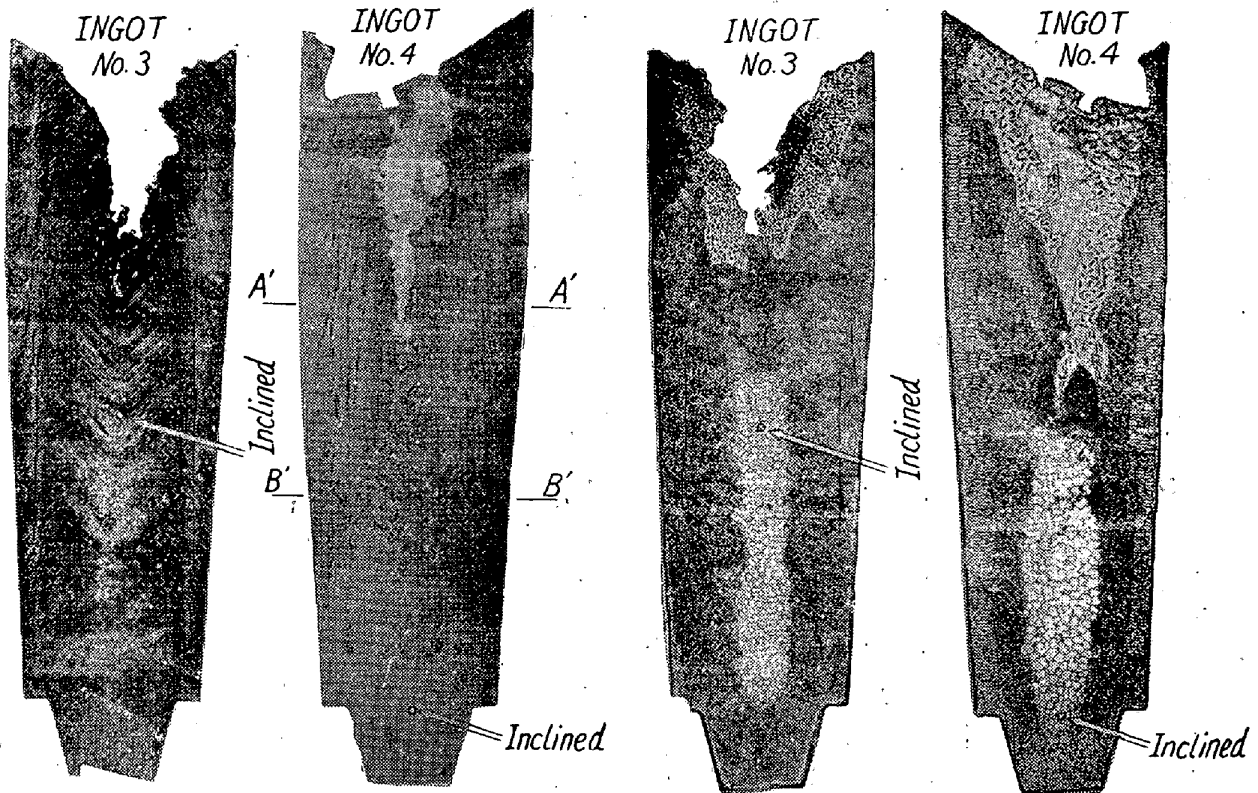


Fig. 4. Sulphur print and macro-etching of ingots No. 3 and No. 4. (Sections A'-A' and B'-B'; refer to Fig. 8)

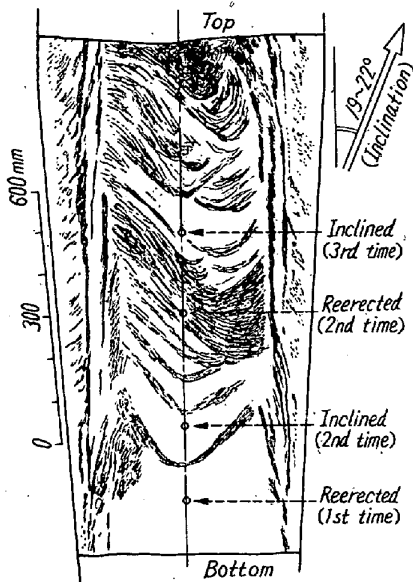


Fig. 5. Sulphur print of central part of ingot No. 2 (hand sketch).

は鋼塊の軸心方向に関して対称に復帰せんとする。

4) 第3回の傾斜により、V偏析は第2回の傾斜の場合と同じような経過を辿って移動している。

5) 傾斜復元とV偏析の移動との間には若干の時間的な“ずれ”があり、鋼塊の頂部側では下の方での傾斜の累積的な影響を受けている。

2) 第2回の傾斜後第2回の復元までの間では、V偏析痕の下端は鋼塊軸心線よりも右へ移動し、またその左右の枝は傾斜中の鉛直線に関して対称になろうとして右旋回しているように見える。

3) 第2回の復元によってV偏析の先端(下端)はふたたび鋼塊の軸心に移動せんとし、また左右の枝

6) 傾斜と復元のくりかえしによって逆V偏析線は滲んで半径方向巾が若干広くなっており、また鋼塊頂部の最大濃化部の形状も傾斜の影響を受けて歪んでいる。

7) 凝固開始より第3回の傾斜後暫時経過するまでの間は凝固はほぼ軸対称にすすみ、この間のV偏析の挙動とは一応独立であることが知られる。

iii) 鋼塊 No. 3 についての観察

Fig. 6 に示すごとく、V偏析線の右の枝は左の枝よりも若干短く、また鋼塊軸心となす角度は右の枝の方が幾分大きく、いずれも傾斜の影響が現われている。

iv) 鋼塊 No. 4 についての観察

Fig. 7 を見ると、鋼塊の下半部では右半分のV偏析は完全に消失し、左側では逆V偏析線の程度に濃く出て

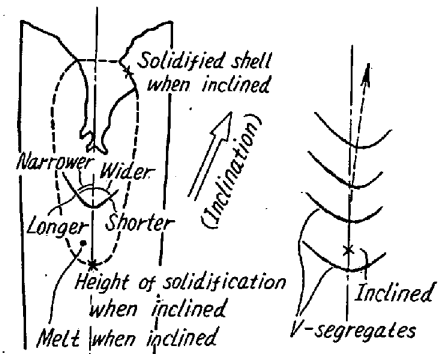


Fig. 6. Sulphur print of upper half of ingot No. 3 (schematically drawn).

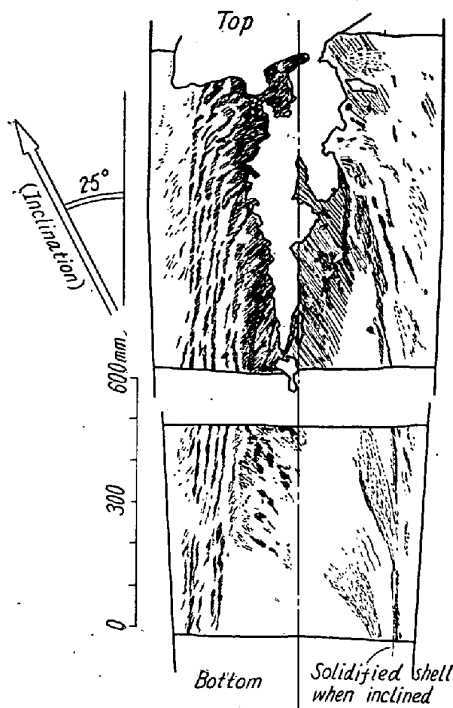


Fig. 7. Sulphur print of ingot No. 4 (hand sketch)

いる。また傾斜開始の時までに出現しつつあつた右側の逆V偏析線は、傾斜凝固に移つてからの垂直方向に左旋し、かつまた薄く散布されて、さらに凝固が進行すると濃縮痕跡が次第に薄くなつていくのが分る。ここで傾斜開始点からの偏析の立上り方を見ると、鋼塊中心部のメルトの中にはいちじるしい対流

がないのではないかと考えられる。鋼塊の上半部では、凝固中に下側であつた右側の逆V偏析線はきわめて薄くとぎれとぎれになつているが、左側では垂直凝固の場合よりも偏析線の本数が2, 3本多く、また一層濃く出ている。Fig. 8の分析結果もこれを裏書きしている。

そこで、逆V偏析線は凝固の前面のメルトの中への濃縮作用と重力場での偏析成分の上方移動作用の二つが重畳することによつて形成されると考えると、鋼塊の左側では固液界面の濃縮作用が支配的であるのに対して、右側では濃縮された合金元素（ここではSを指す）が自由に上方空間へと移動し、上方への移動が濃縮作用をほぼcover しているとするとうまく説明されているのであるが、この点については第IV報において改めて詳論する。

傾斜後の偏析の形成が凝固の進行（ほぼ軸対称）とは独立におこなわれている点は、鋼塊 No. 2の場合よりも一層明白である。

v) 観察結果の総括、V偏析の生成機構

鋼塊 No. 2~No. 4 についての観察を総括すると、

イ) 凝固中のメルト内での対流は無視し得る程度と思われる。

ロ) V偏析の萌芽ともいふべき濃縮痕跡—濃縮の波—はすでにメルトの中に形成され、メルトの中を恐らくは上方へ移動し得、凝固前線がこれを通過する時にそこに固定されると考えられる。したがつて凝固中の鋼塊を傾斜させると、V偏析は鋼塊の軸心を外れた位置に出現する。

ハ) この萌芽は垂直方向の凝固前線の形状とほぼ相似の形状で出現し、一度形成された萌芽は凝固の進行とは無関係にメルトの中を移動し得る。

ニ) 凝固の途中で傾斜することによつて、逆V偏析線の形成におよぼす重力の影響は一層明らかとなつた。などの新しい知見が得られる。

これらの中でとくにV偏析の生成機構について一言すれば、従来発表されている大同小異の諸説<sup>3)</sup>に共通している点は、鋼塊軸心部の固液界面の形状を基準として結晶の成長あるいは沈澱と濃縮熔鋼に対する吸引収縮力との関係を取り上げて、固液界面とV状濃縮痕跡の間の密接な因果関係をいわば a priori に認めていることである。しかるに著者らの実験によれば、両者の関係は限定されたものであり、凝固のある時期を過ぎれば凝固の進行とV偏析の萌芽の挙動はたがいに独立であり得ることを実証的に示したのであつて、従来のV偏析成因に関する解釈は根本的に再検討を要すると思われる。以上の考察から進んでさらに二、三考えられる点もあるが、多少

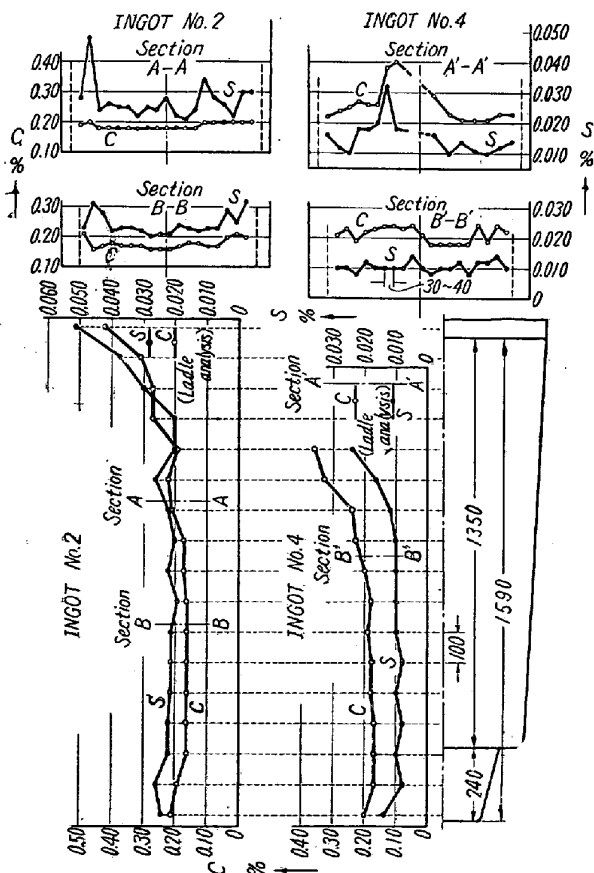


Fig. 8. Distribution of C and S in several sections of ingots No. 2 and No. 4. (Four sections A-A~B'-B': refer to Figs. 3 and 4)

の臆測をとまなうのでここには述べないでおく。

#### IV. 結 論

砂型鑄込 4.9 t 円型鋼塊を垂直凝固，傾斜凝固，および両者の組合せて凝固させることによつて，重力場における大型鋼塊の凝固の際の，偏析の挙動の種々の様相を捕えることができた。これを要約するとつぎのごとくなる。

1) V偏析線は逆偏析域内にも形成されることを再確認した。

2) 凝固後V偏析となるべき濃縮痕跡は，凝固がある程度進んだ後鋼塊軸心部に残存するメルトの中ですでに形成されており，その形状は固液界面の形状に近く，凝固の際にV字状あるいは上開きU字状をなして固定されると考えられる。

3) かゝる濃縮が内部に形成されたメルトの置かれる場の重力の方向を変化せしめると（この実験では 19~25° 傾斜す），この“V偏析痕の萌芽”は新しい鉛直線の方に移動する。一方，最初から傾斜凝固させた鋼塊では，重力の potential の低い側には全くV偏析は現われない。これらの事実は，V偏析の形成におよぼす重力の影響がはなはだ顕著でありまた微妙であることを示す。

4) 逆V偏析線は，この程度の角度の傾斜と複元の繰返しによつてはほとんど変化を生じないが，最初から傾斜凝固させると，重力の potential の低い側でははなはだ薄くなり，高い側では垂直凝固の場合よりもはるかに濃くまた数多く出る。

5) 凝固の進行とV偏析および逆V偏析の挙動とは，凝固のある段階ではたがいに独立の現象であると思われる。

6) 2)~5) から考えると，メルトの中での対流は無視し得る程度のものである。

以上の結果は今後さらに dumping test あるいは

radio isotope を使用する実験によつて追求されること望ましいが，これらの中でとくに，“V偏析の萌芽”が凝固中のメルトの中ですでに形成されることはこれまで知られていなかった事実であり，しかもこれが凝固前線とは独立に動き得ることは従来のV偏析の説明が根本的に再検討されるべきことを示すと考えられる。

本研究の第Ⅱ報ではメルトの中での垂直方向偏析におよぼす重力の影響と逆偏析の成因，本報ではV偏析および逆V偏析におよぼす重力の影響を明らかにしたのであるが，これらの新しい知見を組合せることによつて，大型鋼塊に生ずる三つのマクロ偏析の成因を相互に関連を持たせつつ統一的に説明することができる。これをつぎの第Ⅳ報で述べる。

終りに，この研究を指示され結果の発表を許可された株式会社日本製鋼所副社長柳武氏，ならびに同社室蘭製作所長常務取締役皆川孝光氏に深甚なる敬意を表するとともに，御指導御鞭撻をいただいた本社技術部長松本茂樹氏ならびに室蘭製作所研究部長下田秀夫博士に深謝する。また現場での実験を援助された製鋼課および鑄造課の各位，ならびに熱心に実験に従事された研究部第2課の古沢正義氏，新井田豊雄氏に同様感謝したい。

(昭和 33 年 5 月寄稿)

#### 文 献

- 1) 守川，小野寺，荒木田：鉄と鋼，Vol. 44 No. 8 (昭 33—8) p. 872~880
- 2) 守川，小野寺，荒木田：鉄と鋼，Vol. 44 No. 1 (昭 33—1) p. 9~14.
- 3) 例えば 7th Rep. on the Heterogeneity of Steel Ingots, The Iron & Steel Institute, Special Rep., No. 16 (1937), p. 1~14.  
E. Marburg: J. Metals, Feb. 1953, p. 157~172  
B. Gray: J. The Iron & Steel Inst., Vol. 182, Part 4 (1956), p. 366~374