

Fig. 12. Relation between particle size of burden and operation factors.

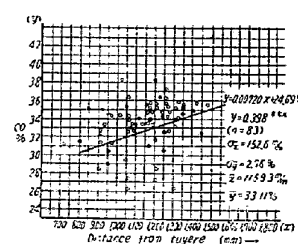


Fig. 13. Relation between distance from center of B.F. and CO content in gas at tuyere level.

終りにこの実験の指導に当たられた和田製鉄部長その他実験に従事された方々に感謝の意を表します。

(昭和 31 年 10 月寄稿)

大型鋼塊における ν 偏析について (I)*

河 合 正 吉**

ON THE ν -SEGREGATES OF LARGE STEEL INGOTS

Masayoshi Kawai

Synopsis:

In succession of the investigation about the A -segregates of large steel ingots, the author is in the way of investigation about the ν -segregates of ingots. He reported here some results of investigation about the ν -segregates as an intermediate report.

At the bottom solidification of ingots the author finds the fact, that dendritic crystals grow after the completion of zone of columnar crystal to some but so much restricted extent. This fact lets him suppose, that the occurrence of free crystals in front of solidified dendritic shell becomes already considerably vigorous even just after the start of the so-called dendritic crystallization, and that dendrites at the bottom are arrested to grow by the shower of free crystals formed in front of themselves, while the growth of dendrites at the side is not so arrested.

And in the course of formation of zones of sedimentary and free crystal, free crystals being created in front of the solidified side shell are presumed to sink downwards and to be piled up on the solidified bottom shell, forming inverted conical piled surfaces with some stationary inclination in succession. The author describes the ν -segregates as those formed under the influence of these conical surfaces. Then, it is observed from the actual results, that the ν -inclination of ν -segregates has close correlations with the ratio of height to diameter of ingots and the dia-ratio of zone of free crystals; and some explanations are given. In conclusion the author refers to the relations between the flaws in ν -segregates and various manufacturing conditions.

* 昭和 24 年 4 月本会講演大会にて発表 ** 三菱製鋼, 長崎製鋼所

I. 結 言

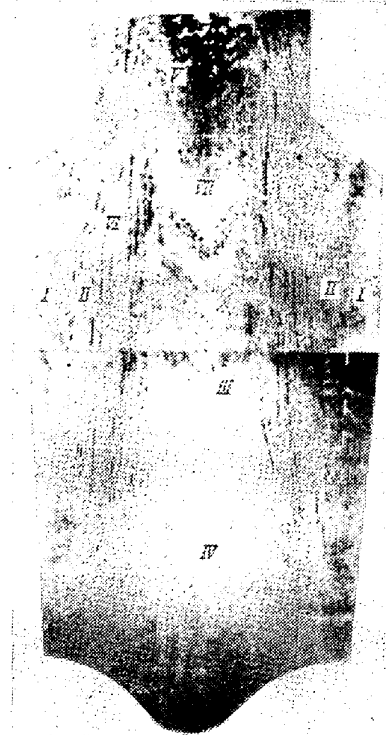
著者は大型炭素鋼鋼塊の偏析に関する調査の一部として、まず実際上問題となることの多いA偏析の調査結果を報告したが¹⁾、その際V偏析に関する議論は保留しておいた。V偏析の生成機構には、A偏析のそれと本質的に異なる点と、一部類似する点とがあるように思われる。著者は一応その見解の概要を、予備的考察として社内報告²⁾に纏め、半公開の三菱技術懇談会の席上発表したことがある。たまた最近 B. Gray が V 偏析の生成機構について簡単な報告³⁾を発表したが、最も基礎的な点において著者の見解とほぼ一致する処のあることに気付いた。よつて著者はこれらの基礎的な諸点を強調し、併せて両者の見解の相違点を明らかにするために、研究未完結のまま敢えてその見解を発表することとした。以下の小論がこの方面の研究に些かなりとも寄与するところあらば幸甚と考える次第である。

II. 沈澱晶および自由晶帯の形成に関する予備的考察

V 偏析はいうまでもなく大部分は自由晶帯に、一部は沈澱晶帯に存在する。よつて予備的考察として、まずこれらの結晶帯そのものの形成について考えることとする。Fig. 1 に 20 t 炭素鋼鋼塊縦断面の硫黄写真を再掲して考察の進行上の一助とする。既報でものべたように著者は広い意味において自由晶帯を沈澱晶帯の延長と考えている。よつてこれら両結晶帯形成を総合しての「芽生え」ともいふべき鋼塊底部の凝固から考察に着手することとする。

(1) 鋼塊底部の凝固過程

熔鋼が鋼塊鑄型に鑄込まれると、鋼塊の側面においては表面に薄い微粒晶層を生じ、これについて柱状晶層が発達し、その発達が停止すれば樹枝状晶の形成がはじまる。これに対し底面においては、柱状層の完成までは側面とはほぼ同様な凝固過程の疎れることは、Fig. 2 の鋼塊底部のマクロ腐蝕像より推論される。前後の凝固過程については、調査文献もあまり見当たらないが、側面とは本質的な差異があるように考えられる。A. Kriz によれば⁴⁾、底部の柱状晶層の上には樹枝的構造の不明瞭な



I: Layer of columnar crystal, I: Layer of dendrites, II: Zone of free crystal, IV: Zone of sedimentary crystal, V: Top segregated zone, VI: Λ -segregates, VII: V-segregates.

Fig. 1. Sulphur print of longitudinal section of a 20 t steel ingot.

“pedestal crystal” が存在し、C.A.F. Benedicks はこれに対して、鋼塊凝固の初期に頂部に形成された crust が、凝固の進行に伴つて彎曲し、破碎され、これらの破片が底部に沈下して pedestal crystal になるのではないかという見解を寄せている。

他方 D. Binnie の報告中⁵⁾、鋼塊各部のマクロ腐蝕像が掲載されているが、その中に鋼塊底部縦断面のマクロ腐蝕像があり、あまり明瞭ではないが pedestal crystal 存在の形跡は認められない。むしろ注目すべき点は D. Binnie も言及しているように、樹枝状晶層の厚さが側面のそれに比していちじるしく薄いことである。

著者も 20 t 鋼塊の調査により、Fig. 2 に示すような底部縦断面のマクロ腐蝕像をえたが柱状晶層の上に pedestal crystal 群と思われるような群域を検出することはできなかつた。しかして D. Binnie の場合と同様に、明瞭な柱状晶層と樹枝的構造の不明瞭な結晶群より成る沈澱晶帯との境目に側面に比して極端に薄い樹枝状晶層の存在することが知られる。よつて著者は A. Kriz の鋼塊にみられた pedestal crystal の形成はな

1) 鉄と鋼, 41 (1955), 854; 1050; 1172; 1233; 42 (1956), 14; 89; 301; 387

2) 三菱製鋼研究雜報, March, 1956, No. 95

3) Jour. Iron and Steel Inst., 182 (1956), 366

4) Jour. Iron and Steel Inst., 125 (1932), No. 1, 133

5) Jour. Iron and Steel Inst., 149 (1944), No. 1, 353

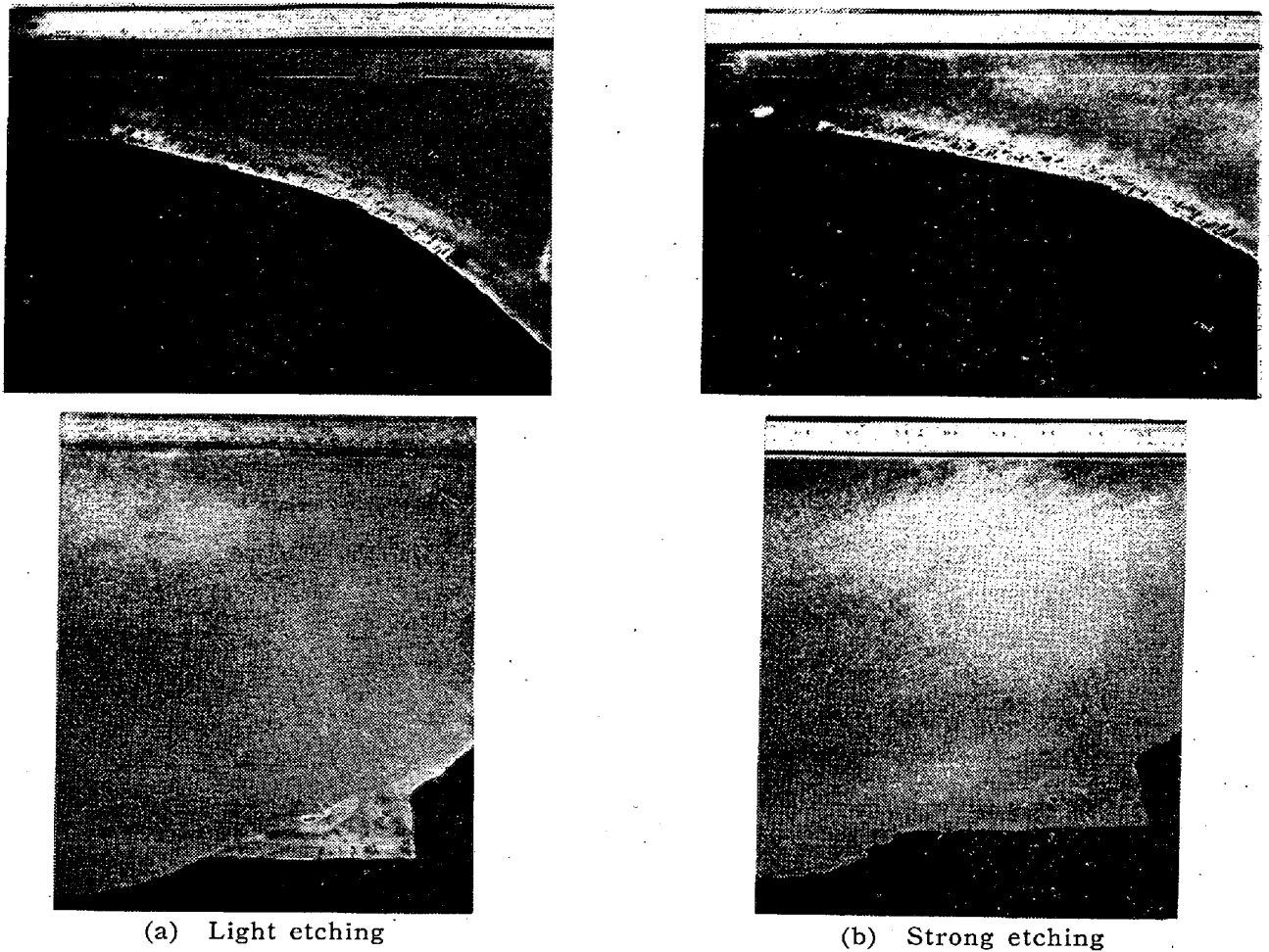


Fig. 2. Macro-structure of longitudinal section at the bottom part of a 20t steel ingot.

んらかの偶発的な原因によるものとし、鋼塊底部よりの凝固の本然の姿は、特徴的な發育不良の樹枝状晶層の形成に現れるものとして、凝固過程の考察を進めることとする。すなわち鋼塊の底部においても柱状晶層の完成後は、側面と同様に樹枝状晶の生長がはじめるが、樹枝状晶層の発達には鋼塊底部に特有ななんらかの原因により少時にして停止することになるのである。

蓋し鋼塊の底部において、柱状晶層の上に樹枝状晶層が形成される場合には、重力に対する幾何学的関係より一般的に樹枝状晶前面に形成される富触熔鋼は浮揚し易く樹枝状晶は側面より生長する場合に比して、より自由に生長しうるはずである。第二の妨害因子として富触熔鋼背後の過冷部に生ずる自由晶が考えられるが、この自由晶は側面においては下方に沈下して樹枝状晶の生長に対して比較的妨害を与えないのに対し、底面においては樹枝状晶前面に生じた自由晶を、その樹枝状晶自身が浴びることになるのである。したがって斯様な自由晶の発生が盛んになれば、底部における自由晶の発達はただちに阻止されるであろう。もし上述の鋼塊底部における樹枝状晶層の發育不良がかかる原因によるものとするれば樹

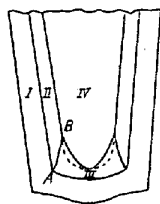
枝状晶の生長に伴って生ずる富触熔鋼の背後における自由晶の発生は、樹枝状晶層形成の初期から相当に激しく行われるものと仮定しなければならない。逆にこの仮定を真なりとすれば、上述の低部における特徴的な樹枝状晶層の發育不良という凝固過程は極めて自然に記述されることになり、ここに底部よりの凝固すなわち縦凝固と、側面よりの凝固すなわち横凝固との間の本質的な相違が把握されることになるのである。

(2) 沈澱晶および自由晶帯の凝固過程

鋼塊の凝固過程において、樹枝状晶層が形成される時期には、熔鋼全体の温度は凝固点附近まで降下し、樹枝状晶の生長に伴って富触熔鋼が形成されれば、その背後は容易に過冷されて自由晶が発生するが、上述の鋼塊底部における發育不良の樹枝状晶層に関する考察により、樹枝状晶層形成の初期より自由晶の発生が相当激しく行われることが結論された。前報告でのべたように、側面の樹枝状晶は、最初は主として富触熔鋼の妨害を受けつつ生長し、凝固の進行に伴って次第に自由晶の妨害をも受けるようになり、終には多量に懸濁する自由晶によってその生長が阻止されるが、この間に厚い樹枝状晶層が

完成され、横凝固過程の大部分は柱状晶および樹枝状晶層の形成によつて占められる。これに対して縦凝固過程の大部分は、底部の薄い樹枝状晶層形成後の自由晶に関連する凝固、すなわち鋼塊の芯部における沈澱晶および自由晶帯の凝固によつて占められる。しかればこの自由晶に関連する凝固は如何にして進行するであろうか。

まず底部よりの樹枝状晶の生長が阻止された直後には樹枝状晶と接触する富融熔鋼は、その背後から沈下して樹枝状晶上に堆積する自由晶によつて押上げられ、その一部は凝固殻の完成に費され、一部はまた上方への浮揚ないしは拡散によつて失われるが、大部分は凝固殻前面に残留してその背後にふたたび自由晶を発生せしめるであろう。これらの自由晶が沈下堆積すれば、富融熔鋼はふたたび押上げられ、以下斯様な過程が繰返されて凝固が進行するが、この際自由晶の堆積と、側面よりの樹枝状晶層の発達とが同時に行われる結果として、沈澱晶帯は底面の柱状晶層の上にはほぼ円錐体を形成しつつ上方に発達して行く。この際沈澱晶帯の上面は、最初はほぼ凝固点等温面と一致するであろう。他方側面の樹枝状晶前面に発生する自由晶はもちろん沈下して上述の自由晶群に加つて底部に堆積するであろうが、沈澱晶帯形成の初期には熔鋼の底隅部の堆積に寄与するにすぎないであろう。しかし凝固が進行するにしたがつて熔鋼の径が細くなり、側面よりの自由晶の沈下の影響は中心部の堆積にまでおよぶようになるであろう。この状況を模型的に Fig. 3 に示す。図中点線は側面よりの自由晶の沈下が起らない場合の理想的な凝固点等温面を表わすものであ



I : Zone of columnar crystal
 II : Zone of dendrite
 III : Zone of sedimentary crystal
 IV : Molten steel
 Dotted line : Ideal isothermal surface of solidifying temperature

Fig. 3. Piled surface of zone of sedimentary crystals in the way of solidification.

るが、図はまた堆積面の等温面よりの偏向を定性的に示している。Fig. 3 における樹枝状晶層と沈澱晶帯との境界面 AB はもちろん樹枝状晶層の発達が自由晶の堆積によつて停止させられたことを表わすが、さらに凝固が進めば側面の樹枝状晶層は懸濁する自由晶によつても生長妨害を受けるようになり、この妨害効果は自由晶の密度

の高い下方の側面ほど多く受けるであろう。したがつて終には堆積面直上 (Fig. 3 を例にとれば B 点直上) での樹枝状晶の生長はほとんど阻止され、爾後の凝固においては熔鋼の径はほとんど一定になることが期待され、ここにはほぼ円錐状の結晶帯が形成されることになる。この結晶帯が自由晶帯に他ならぬのである。しかして自由晶帯の形成時には樹枝状晶層の発達ほとんど終熄するから側面の冷却効果の大部分は自由晶の生成すなわち縦凝固に向けられることになる。しかも底面の冷却効果は実用鋼塊においては側面のそれに比して遙かに小であるから自由晶帯形成時の縦凝固は側面の冷却効果によつて支配されるといつても過言ではない。よつてこの時期には、熔鋼底部における温度降下は凝固殻前面における自由晶の発生を促すよりは、むしろ側面より沈下してきた自由晶の生長を促進させることに向けられるであろう。

(3) 凝固速度

著者は簡単な計算によつて、横凝固に関して

$$t = (d/\alpha)^2 \cdot (1 - \beta d/R) \dots\dots\dots (1)$$

なる理論式をえた⁶⁾。ここに α , β は熔鋼の過熱温度および特性等と関連する常数、 d は凝固殻の厚さ、 R は鋼塊を円錐と考へた時の半径、 t は凝固時間を表わすものとする。他方 E. Marburg 等⁷⁾ は鋼塊の横凝固および縦凝固に関して、凝固時間と凝固殻の厚さとの関係を求めている。Fig. 4 はその実験結果の一部であつて、とくに縦凝固は鋼塊の軸上の凝固について観測した結果である。横凝固に関しては著者の理論式はその傾向において実測値とよく一致している。なお凝固の初期においては

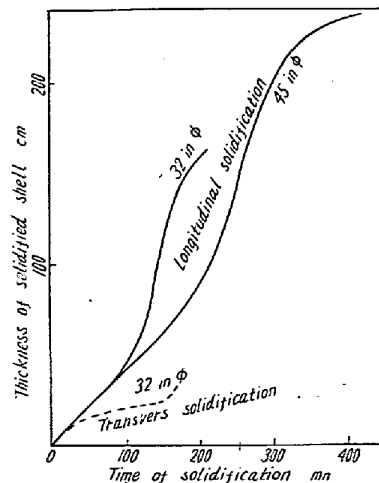


Fig. 4. Progress of solidification.

6) 昭和24年度日本鉄鋼協会第37回講演大会において発表
 7) Jour. Metals, 5 (1953), No. 2; W. Martin u. E. Thon: St. u. Ei., 55 (1955), 1765

横凝固では $d/R \ll 1$, 縦凝固では側方の影響が無視され見掛けの R に対して d が小であるから (1) 式は両者に対して

$$t = (d/\alpha)^2 \dots\dots\dots (2)$$

なる形で成立し、両者の凝固速度はほぼ等しくなるはずであるが、実測値はよくその関係を表わしている。さらに凝固が進めば側面からの冷却効果が効いてくるために縦凝固は横凝固よりも速くなり、自由晶帯の形成が開始すれば、前述のように鋼塊全面からの冷却効果が縦凝固の促進に集中されるために縦凝固速度の急激な増大が期待される。しかし頂部に達すると主として押湯効果のために凝固速度はふたたび低下するであろう。

確かに実測値は縦凝固に関してこの傾向をよく示している。以上において縦凝固速度の著増現象が実験的に確かめられたことは重大な意義を有するものと考えられる。

III. V 偏析

(1) V 偏析の性状

鋼塊の沈澱および自由晶帯には Fig. 1 にみられるような V 状の偏析部が存在する。これらの偏析部は鋼塊の横断面における現出状態より、大体において鋼塊の軸上に頂点を有する逆円錐面に沿って現われることが推論される。しかしこれらの偏析部は Fig. 1 にみられるように、沈澱晶帯のほぼ上半部からある間隔をおいて、いわば週期的に分布し、偏析部の硫黄写真の濃度は鋼塊の上部に行くほど濃くなる傾向を示している。なお便宜上これらの偏析全体を V 偏析、V 状をなす個々の偏析部を V 偏析部と呼ぶこととする。

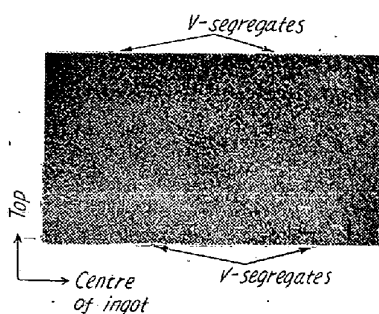


Fig. 5. Macro-structure of V-segregates.

Fig. 5 は自由晶帯の上部に現れた V 偏析部の一部のマクロ組織を示すものであるが、V 偏析部の輪廓は極めて不明瞭であつて、その内部に樹枝状晶より成る異常部が散在していることが判る。この異常部を検鏡すれば C, P, S の偏析が認められ、例外なく多量の硫化物、場合によっては燐化物を伴うこともある。よつてこれを偏析塊と呼ぶこととする。この偏析塊の中には Fig. 6 のように、収縮孔と見做される空隙を伴うものがある。また

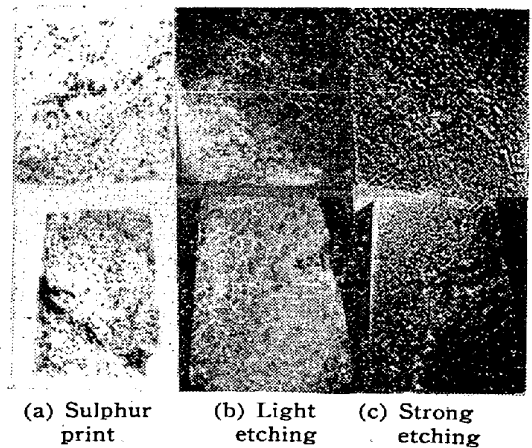


Fig. 6. Segregated lumps of γ -segregates accompanied by cavities.

(b) の軽腐蝕像においては空隙の周囲に一次晶の粒界を表わすフェライト網がみられないが、これはその部分に C が偏析していることを物語るものである。なお自由晶および沈澱晶帯には樹枝状晶層における偏析小素面類似の微小な偏析部の分布が認められるが、これらは大部分 V 傾斜をなし、とくに偏析塊の近傍に顕著に現われる。

(Fig. 6 (c) 参照)

(2) V 偏析の生成機構

つぎに以上のような性状を有する V 偏析の生成機構について考察することとする。予備的考察において自由晶の堆積現象に触れたが、まずこの点について考察を進めることとする。

凝固の初期においては熔鋼底部の凝固殻附近に生ずる温度低下は、富硫熔鋼の存在の下にその背後に自由晶の発生を促し、他方において堆積した自由晶間の熔鋼を凝固させて凝固殻を完成させるであろう。斯様にして凝固が進めば、凝固殻の上面は Fig. 3 に示した凝固点等温面と一致しながら上昇することは前述のとおりである。他方側面の樹枝状晶前面に発生した自由晶はまず底隅部に堆積し、中心部の堆積には影響を与えないであろう。これら側面からの自由晶の堆積を、同様な状況の下に水中を沈下する砂粒の堆積から類推すれば、つぎのような堆積過程が考えられる。すなわちまず自由晶は底隅部に堆積するが、沈下してきた自由晶が堆積する際には、一部は堆積の高さを増加させ、他部は中心部に向つて崩落して堆積の裾を拡げるであろう。この間に熔鋼の径は次第に細くなり、自由晶の沈下量は増加するであろうから、比較的速かに側面よりの自由晶の沈下の影響が鋼塊の中心にまでおよぶようになるであろう。なお凝固の進行に伴つて、側面よりの自由晶の沈下が起らなくても下部側面の冷却効果の影響を受けるが、側面よりの自由晶の沈

下堆積は凝固点等温面の形状を変化せしめ、しかも直接的に凝固速度を増加せしめるから、縦凝固は全側面の影響を受けることになる。

さて以上のように側面よりの自由晶の堆積が鋼塊の中心に達するようになれば、熔鋼の底部には、いわばすり鉢状の堆積面が形成されるであろう。しかして堆積面の形成過程において、堆積面の傾斜角は自由晶粒の息角と関係を有するであろう。しかし息角は静止の状態における堆積面の傾斜を表わすものである。実際の堆積状況においてはたえず上方から自由晶が供給されるから、自由晶の堆積はおそらく安定な息角傾斜をなす部分と、その上でたえず中心部に向つて崩落する、不安定な堆積部とよりなり、堆積の表面をなすこの不安定な堆積部の表面の傾斜は沈下する自由晶の供給速度によつて決定されるであろう。この意味においてその傾斜角を定常傾斜角と名付けることとする。上述の熔鋼底部のすり鉢状の堆積面の傾斜角はその際の自由晶の供給速度によつて定まる定常傾斜角に相当することになる。斯様な状況の想像図を Fig. 7 に示す。図はある時点における凝固面 DBA₀C 面上の自由晶の堆積状態を示すものである。

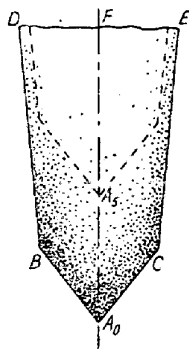


Fig. 7. Imaginary picture of sedimentation of free crystals.

つきに熔鋼底部に存在する富触熔鋼の凝固過程におよぼす影響について考察する。凝固の初期においては前述のように凝固附近の温度降下は富触熔鋼の背後に自由晶を発生せしめ、その結果として自由晶の母液は不純物で富化され、自由晶が凝固殻上に堆積すれば、富触熔鋼は押し上げられてその母液と合体する。しかして富触熔鋼の上方への浮揚ないしは拡散による損失は、その直上に発生する自由晶の存在およびその沈下によつてある程度防止されるであろうから、富触熔鋼は次第にその量と富化度を増して行くであろう。しかし凝固の進行に伴い、側面よりの自由晶の沈下が底隅部より次第に中心にまで影響をおよぼすようになる。たとえば Fig. 7 のような状態になれば、富触熔鋼の背後は多数の側面より沈下し

た自由晶によつて占められ、その過冷効果は新たな自由晶の発生よりも、沈下してきた自由晶の生長となつて現れるであろう。したがつてこの場合にも富触熔鋼の量と富化度の増大は継続するであろう。斯様な富触熔鋼の存在の下に凝固過程を記述すればつぎのとおりである。

まず代表的に Fig. 7 の鋼塊の軸に相当する A₀F 線上で考えることとする。いま凝固殻が A₀ 点まで完成された際に富触熔鋼の影響を無視し、A₀ 点上方の熔鋼の凝固温度はほぼ一定値 T₀ をとり、A₀ 点より充分上方では熔鋼の温度は T₁ であるとし、その際の温度分布は Fig. 8 の曲線 0 で表わされるものとする。凝固が進むに

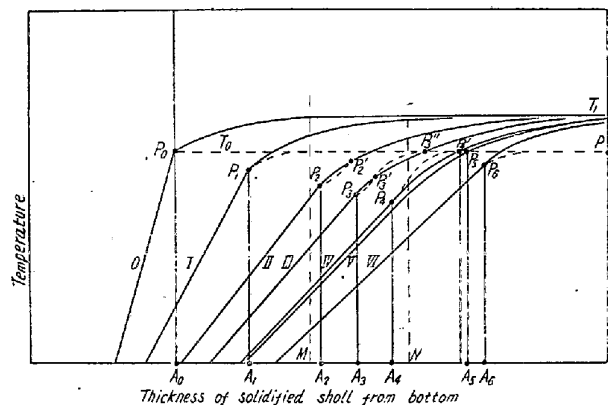


Fig. 8. Mechanism of vertical solidification explanation about formation of V-segregates.

したがつて富触熔鋼の影響が顕著になり、凝固点分布は P₁P₄'P を結ぶ点線で表わされるようになり、曲線 I の温度分布が成立するものとすれば、凝固は A₁ 点まで進む。さらに凝固が進み凝固点分布が曲線 P₂P₂'P₄'P (点線)、温度分布が曲線 II となれば、P₂-P' 間は熔融状態が維持されたまま P₂' 点に相当する箇所に凝固がはじまり、温度分布が曲線 III になれば、凝固点分布との関係により、凝固殻本体と P₃'-P₃'' 間に相当する部分に生ずべき薄い凝固層との間に富触熔鋼の一部 (P₃-P₃') が挟まれる可能性を生ずる。もちろん斯様な現象すなわち “bridging” は常に起るとは限らず、適当な条件に恵まれた箇所にのみ起るであろう。bridging が起れば増大しつつあつた富触熔鋼は次第に消費され、斯様な状態は温度分布が曲線 IV で表わされる状態に達するまで続き富触熔鋼の大半が消費されて了うと、曲線 V の状態となり、温度分布と凝固点分布との関係はほぼ最初の状態に還元し、凝固は A₅ 点まで進行する。しかる時 Fig. 8 の MN 間では顕著な bridging が起り、これらは凝固後には顕著な偏析部となつて MN 間に分布するであろう。しかして A₀F 線上では A₁-A₅ 間の過程を一週期とす

る週期的な凝固過程が進行するから、凝固後には A F₀ 線上に偏析度の週期的変動が現われ、その変析度の高い箇所(MN)部には bridging に帰因する偏析部の集団を伴うが、全般的な偏析度の変動は凝固時に存在していた自由晶によつて緩和されて現れるであろう。また以上は鋼塊の軸上について考察された結果であるが、他の鉛直線上でもほぼ同様な凝固過程が進行するであろうから、熔鋼の底面にほぼ平行に、換言すれば側面の自由晶の沈下によつて生ずる逆円錐面をなす堆積面に沿つて、鉛直方向に偏析度ならびに偏析部の分布の立体的な週期的変動が現れるであろう。したがつてこれらの偏析度の高い箇所ならびにこれに伴う偏析部は、鋼塊の軸に沿う縦断面にほぼ週期的に V 状をなして現れるであろう。以上が V 偏析ならびにこれを構成する V 偏析部の生成機構の記述に他ならない。また V 偏析部に bridging に帰因して現れる偏析部が前述の偏析塊に相当するものであろう。

なお上述の凝固過程において、凝固面附近の凝固点分布と温度分布との関係を厳密に考えれば、富触熔鋼の背後に自由晶の発生を考える限り、常に曲線Ⅲの場合と同様な状態が成立しなければならないはずである。しかしたとえば曲線Ⅰの場合には、仮令 bridging が起つても bridging された富触熔鋼の容積は極めて小であり、実質的に実際上の問題となることはほとんどないであろう。この意味において Fig. 8 は凝固過程をある程度巨

視的に観察するために画かれたものであり、比較的大きな bridging の生起、すなわち偏析塊の生成の記述を目的の一つとしたものである。

また著者は V 偏析形成の原因を bridging そのものに求めてつぎのように考えたこともある。すなわち側面よりの自由晶は沈下して傾斜した堆積面を形成するが、その傾斜はいわゆる息角を越えて増加するが、ある限度に達すると不連続的な崩落が起り、傾斜角はほぼ息角となり、ふたたび傾斜の増加が初まり、以下この過程を繰返して凝固が進むものと考え、この不連続的な崩落時に bridging が起るものとした。この考えは B. Gray のそれとほぼ一致する。しかし著者は堆積過程を修正して前述のように連続的な崩落を考え、偏析ないしは bridging の生起の一次的原因を富触熔鋼の特性に求めたのである。この修正の理由は、まず A. Kriz の砂型鑄型で造塊された鋼塊(次報 Fig. 14 参照)および C. Person 等の特殊な造塊法で製造された鋼塊⁹⁾にも V 偏析類似の偏析がみられること、ならびにつぎにのべる V 傾斜角に関する考察により、不連続的な崩落現象がすべての自由晶堆積の場合に伴う本質的な部分過程としては認め難く、むしろ仮令起るとしても特殊な場合にのみ期待される過程にすぎないという点に在るのである。

(昭和 31 年 7 月寄稿)

大型鋼塊用ダクタイル鑄鉄鑄型の寿命について*

(その使用結果に関する二、三の検討)

北 島 哲 男**・河 野 忠 信**

ON THE LIFE OF THE LARGE INGOT MOULDS MADE OF DUCTILE CAST IRON

(Some Considerations on the Comparison Test)

Tetsuo Kitashima and Tadanobu Kōno

Synopsis:

The experimental and practical results of the small ingot mould made of ductile cast iron were reported by many authors. However in the case of the large ingot mould, it seems to be not yet reported in detail.

Therefore, the authors made the experiment on the large ingot mould, i.e., C-61 type (weight: 5,230kg, wall thickness 130mm) and C-56 type (weight: 4,900kg, wall thickness 125 mm) which are used at Yawata Iron & Steel Works, for the purpose of comparing ductile

* 昭和30年10月本会講演大会北海道大学にて発表, ** 八幡製鉄所