

主要 3 マクロ偏析生成機構の総合的説明*

(大型鋼塊の凝固および偏析に関する研究—IV)

小野寺 真 作**・荒 木 田 豊**

An Unified and Systematic Interpretation for the Mechanism of Formation of the Three Major Segregations

(Studies on the solidification and segregation of larger steel ingots—IV)

Shinsaku Onodera and Yutaka Arakida

Synopsis:

In the 2nd and 3rd Reports (Tetsu-to-Hagané, 1958, No. 8, p. 872~880, and No. 11, p. 1259~1265) the authors made some observations and experiments with the large ingots which revealed several phenomena concerning the vertical segregation occurred in the melt of ingot core. Combining these new findings with some of the known primary causes for segregation, an unified and systematic explanation for the mechanism of formation of the three major segregations, i.e. inverse V, V and negative segregation, can be derived.

Assuming that the convection and chemical changes in the melt of solidifying core, Soret-effect at the liquid-solid interface, dilution (diffusion) of concentrated elements into the mother-liquor, etc. have no first-order effect upon the formation of macro-segregation, then the concentrating action at the liquid-solid interface and upward transfer in the solidifying melt play a leading rôle in the course of forming macro-segregations, as follows:

i) Inverse-V segregation: Nearly horizontal concentration and upward movement of segregating elements give a resultant direction to the inverse-V strings. A key point of difference from the older concept lies in the manner that the enriched segregates move upwards without convection. (cf. 2nd & 3rd Reports).

ii) V and negative segregations: The forming mechanism of both segregations is essentially identical. The difference in the balance between the upward concentration and upward movement in the melt merely produces V or inverse segregation. (Figs. 3 & 4)

iii) Unified mechanism of formation for the three segregations: From i) & ii), the three segregations are formed as the liquid-solid interface advances inwards. (Fig. 5)

I. 結 言

大型鋼塊の主要なマクロ偏析である逆 V 偏析、V 偏析および逆偏析の生成機構については、諸家の研究により種々の説が出されている。これらを通観するとほぼ定説と云えるものを要約し得るようであるが、しかしその多くが凝固後の鋼塊断面の局部的観察あるいは異種物質による凝固の模擬実験などに基いて臆測を行つていのがまづ問題であるほかに、凝固が鋼塊の外周部より軸心部へと連続的に進行するにもかかわらず、3 偏析の生成過程の説明には相互になんらの関連も考慮されていないと云う疑問がある。そもそも鋼塊の偏析の全貌は Fig. 1 (a) に示すごとくであつて、3 偏析がこの分布面における谷あるいは峯に過ぎないことは改めて指摘するまでも

ない所であるが、従来は主として鋼塊の縦断面の観察に基いて、Fig. 1 (b) のごとく 3 偏析のみを、しかも個別的に取上げて来た傾向がある。

この研究の第 II 報²⁾および第 III 報³⁾で著者らは、大型鋼塊の実際の凝固に即しての観察と実験とによつて、3 偏析の生成過程における重力の影響の種々の様相を明らかにしたが、本報では実証的な考察をさらに進め、3 偏析の生成機構を相互に結びつけて総合的に、統一的に説明することを試みる。

本文に入る前に一言したいのは鋼塊の偏析を論ずるに當つての観点あるいは範囲の問題である。表題のごとく

*—昭和 32 年 4 月本会講演大会にて発表

** 日本製鋼所室蘭製作所研究部第 2 課

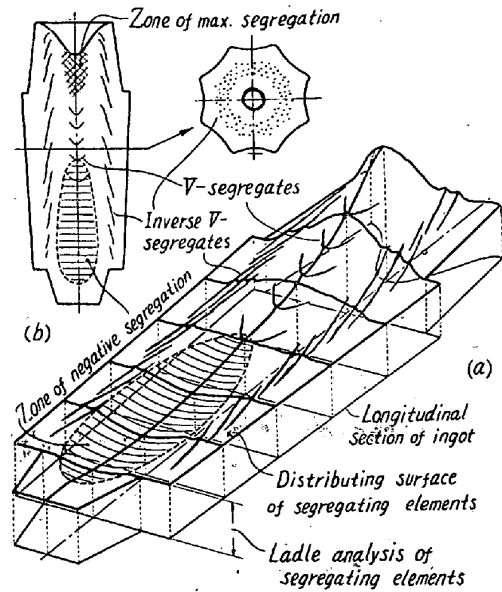


Fig. 1. Three major segregations in a large ingot, perspective drawn as peaks and valleys on the distribution surface along the longitudinal section.

本報ではマクロ的な立場から3偏析を取扱うが^{*)}、このほかミクロの偏析についての諸問題も見出されつつあり⁴⁾、また両者の中間のorderの問題としては逆V偏析線およびV偏析痕についての従来の諸研究の一部が挙げられる。なおまた、マクロ偏析の程度は成分元素ごとにいちじるしく相違し、次節に述べるごとき種々の素因との関係もまた元素ごとに異なるのは周知の事実であるが、総合的に見て偏析の最もいちじるしいC, P, Sを中心とし、サルファー・プリントによつて書き出される偏析像を手にして考察を進めることとする。

8角または円型断面の上拡がりキルド鋼塊を対象として考える点は前報と同様である。

II. 主要3偏析の生成機構に関する従来の知見とその素因

I) 3偏析の生成機構に関する従来の知見

主要3偏析の生成機構に関する諸説を網羅して総括批判することは著者らの目的とする所ではないが、以下の論述に必要な最小限の程度に従来の知見を要約して、疑問の点を指摘しておく。

(1) 逆V偏析

英国鉄鋼協会の鋼塊不均一性調査委員会が要約した周

^{*)} 鋼塊のマクロ偏析としては、このほか頂部収縮孔基部の最大濃化域とコーナー・ゴーストをも挙げ得るがこれらは鋼塊全体から見れば局所的なもので、また成因も明白と思われるから、本報告では論議の外におく。

知の説⁶⁾では、凝固殻に隣接する合金元素の濃縮されたメルトの上昇運動を固液界面の進行と組み合わせることによつて逆V偏析線を説明している。最近の河合博士の論文⁷⁾でもほとんど同じ考え方が一層詳細な観察に基いて述べられているがこの説は現在最も妥当なものと思われる。このほか樹枝状晶層の発達過程において種々の原因によつて樹枝状晶間に生じた空隙中に残存しあるいは捕捉された濃縮熔鋼の凝固によると云う説、また上昇気泡痕跡説などもある。

これらの諸説に共通の疑問はつぎのような点である。

(イ) 濃縮熔鋼は一团としてある限定された経路に沿つて流体力学的な運動によつて上昇するとしているが、メルト内での対流の問題が明らかにされていない。

(ロ) 逆V偏析線は Fig. 1 (b) に示すごとく鋼塊軸心に直角な断面内では、“string”の束として円輪状に分布するが、かかる濃縮の痕跡は何故に連続した“layer”とはならぬかが不明である。この意味においては河合博士によつて氏のいわゆる偏析小素面が明確に記述されたことは大きな前進であるが、しかしこれを以てしてもやはり string の問題の解明に程遠い。

(2) V偏析

凝固の途中の鋼塊軸心部の固液界面の形状は、dumping test あるいは熱伝導の計算によつて直接間接に知られているが、軸心部における上方への濃縮過程と固液界面の上方のメルト内での結晶の発生とその成長、沈下、崩壊の過程を組合せ、要するにこの固液界面の形状にほぼ等しく、周期的にV状の濃縮痕跡が残される、と云うのが諸説の中心点のようである⁸⁾⁹⁾。

著者らが疑問に思うのはつぎの諸点である。

(イ) 軸心部の固液界面には果して収縮吸引力が作用するかどうか、また進行しつつある固液界面に結晶の崩壊があるかどうか、これらの点が実際の鋼塊について観察確認されていない。

(ロ) 何故周期的に現われるか。

(ハ) V偏析は逆偏析域の上部にも現われるが(第Ⅲ報⁹⁾のⅢ. 参照)下に述べるごとく逆偏析に対する沈澱晶説との関係はどうするか。

(3) 逆偏析

出鋼時のメルトよりも合金成分の少い区域を説明するために、高純度結晶が発生沈降すると云う沈澱晶説が考えられることが多いが、この逆に偏析した湯がこの区域から上昇し去るためであるとも提案されて来た⁶⁾。

主な疑問はつぎの諸点である。

(イ) 沈澱説あるいは上昇説、ともに実際の鋼塊の凝固

に即した証拠がなかつた。

(ロ) 高純度の結晶が沈降するとすれば、少くとも逆偏析域においては、各元素の濃縮あるいは稀釈はほぼ同じ比率でなければならないが、実際に観察される所では C, P, S; Si, Mn; Ni, Cr, Mo, etc. のグループ別に全くその程度を異にしている。(第Ⅱ報²⁾参照)

(イ) 濃縮熔鋼が上昇するとすれば、まずどのようにして濃縮され、つぎにこれがどのようにして上昇するか。逆偏析域の存在と云う事実のみからの臆測は飛躍が過ぎないか。

(ニ) 前述のごとく V 偏析の説明に当つては固液界面の濃縮を中心として考えているのに、その直下に隣接する(あるいは共存する)逆偏析に対しては何故濃縮を取上げないのか。(ただし沈澱晶説の場合)

II) マクロ偏析の素因

以上の諸説を通じて指摘されることは、凝固中のメルトにおける偏析の素因は鋼塊内の位置によつて異らぬ筈であるのに、3 偏析の説明に当つていくつかの素因の中のあるものを取上げたり取上げなかつたりしている点であつて、各偏析は鋼塊全体のマクロ偏析の一部であると云う立場からの一貫した認識に欠けている点に疑問の余地がある。

それ故本論に入る前に、鋼塊の偏析の素因として考えられる事項を著者らが新たに確認したものをも含めて列挙し、その影響度を実際の鋼塊の凝固に即して区別しておく。

- (1) liquidus と solidus との相対的位置による、固液界面における合金元素の濃縮¹⁰⁾。
- (2) 濃縮された元素のメルトの中への拡散稀釈¹¹⁾。
- (3) メルトの中での結晶の発生と成長、成長の方向性。
- (4) メルトの中、および凝固後高温にある部分における化学的変化、特に非金属介在物の挙動。
- (5) 重力の作用
- (イ) 重力場における熱力学的平衡への接近作用によるメルトの中での合金元素およびその化合物の垂直方向移動(問題とする C, P, S では上方移動)²⁾。
- (ロ) 凝固中のメルトの中での対流³⁾。
- (ハ) メルトの中に発生した高純度結晶の沈降。
- (6) Ludwig-Soret effect¹²⁾¹³⁾。
- (7) メルトの中、および凝固時における気泡の発生
- (8) 凝固熱の発生時期(固液界面との相対的位置)、

過冷。

厳密に云えばこれらの素因の全体の詳細を知らなければ

ば偏析の機構も解明し得ないのは当然であるが、問題をマクロ偏析の説明に限るならば近似的な考え方も可能である。

すなわち第Ⅱ報²⁾に示したごとくまず(5)の(ロ)は考慮しなくても良く、(2)と(6)は偏析を若干低減する方向に作用するが(1)および(5)の(イ)に比べて省略し得、(3)、(4)、(7)は(1)および(5)の(イ)に若干の影響はあろうが order 的には小さい、と考えられる。また(5)の(ハ)は(5)の(イ)に重畳して取扱得ることは既に第Ⅱ報²⁾に論じた通りである。(8)は逆 V 偏析および V 偏析の周期性に関係する minor order の素因と考えられる。

これを要するに、著者らが以下に展開する 3 偏析の生成理論は、前報²⁾³⁾に報告した重力の影響に関する新しい知見を、従来から周知の固液界面の濃縮と組合せる点にその骨子があるのである。

III. 逆 V 偏析線の生成機構

逆 V 偏析線の生成機構に関する著者らの考え方は、前節 I) の(1)に述べた英国鉄鋼協会の鋼塊不均一性調査委員会の見解と本質的には類似のものである。ただし濃縮熔鋼は対流によつて上昇するのではなく、前節 II)、(5)の(イ)に指摘したごとく溶質または溶質の濃化した小融体として比重差によつて上方へ移動するのであり、メルト内の対流は全く取上げないこと、濃縮は単純な濃縮ではなくてこれを低減させる種々の素因を差引いたものであること、また凝固面が垂直に近い方向をとることが逆 V 偏析線の出現に必要な条件であること、などの諸点は従来の見解に付け加える点である。

この見解の根拠となる観察と実験については第Ⅱ報²⁾および第Ⅲ報³⁾に詳しく示してあるが、説明の便宜上その要点を再掲すれば、Fig.2(a)は垂直に置かれた鋼塊が

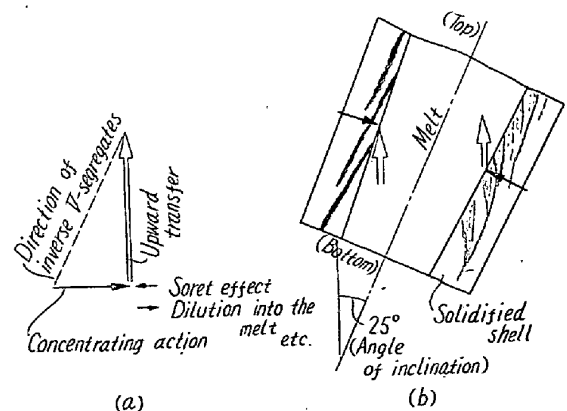


Fig. 2. Forming mechanism of inverse V-segregates.

凝固する際の逆V偏析線の方向を決定する vector 的な線図であり、この場合重力の方向は凝固面にほぼ平行である。これに対して凝固中の鋼塊を傾斜させると重力の potential の低い側の鋼塊半分（縦断面にて）では逆V偏析線はほとんど消失し、高い level の側では垂直凝固の場合よりも一層濃く数多く出ている。この場合の vector 的關係を Fig. 2 (b) に示す。凝固の前面では逆V偏析線の形成に影響を及ぼす程の対流のないことも第Ⅲ報³⁾に示した。

しかし以上の説明では逆V偏析線が鋼塊内の空間的分布において何故 layer とならずに string となるかを依然として説明し得ない。恐らくは前節に挙げた Soret effect, 凝固熱の発生時期（過冷層の位置）なども重要な役割を持つと想像されるが、従来と同様の過度の臆測を避けるため、さらに観察と実験を重ねてから、より minor order の問題として取扱いたい。現段階では濃縮は何らかの理由によつてとぎれとぎれの string 状痕跡としてある程度進み、一旦濃化が停止して、後再びつぎの string が発生する、と云う過程を単に繰返すものとしておく。

IV. メルト内での垂直方向偏析作用と V偏析および逆偏析

第Ⅱ報²⁾では鋼塊軸心部に凝固しつつあるメルト内での垂直方向偏析生成過程を捕え、逆偏析域は偏析成分の上方移動によつて形成されると考える方が従来の沈澱品説よりも合理的であることを実証的に論じたが、この場合偏析成分の上方移動のみでは不十分で、軸心部の凝固面でメルト内への濃縮作用との balance を考えるべきことを指摘しておいた。

また第Ⅲ報³⁾では軸心部のメルトの中にはV偏析痕の萌芽とも云うべき濃縮の波が出現し、恐らくはこれがメルトの中を上昇して移動し得、固液界面がそこを通過する時にV偏析痕として固定されることを傾斜凝固鋼塊での実験によつて明らかにした。

以上の諸事実を組合せることによつて、鋼塊軸心部の凝固に伴う逆偏析とV偏析の形成過程をつぎのごとくに説明することが可能となろう。

第Ⅱ報に述べたごとく、従来周知の鋼塊軸心沿いの縦方向偏析は、凝固の途中の各時刻におけるメルトの組成曲線の先端を連ねるものであるが [Fig. 3 (a)], 今 Fig. 3 (b) のごとく凝固が底端AよりBの高さまで進行した時刻を考えると、固液界面には上向きにBCDのごとき濃縮作用がある筈である。逆偏析の部分ではこれが完全に上方へ移動することによつて [Fig. 3 (c)] peak は現わ

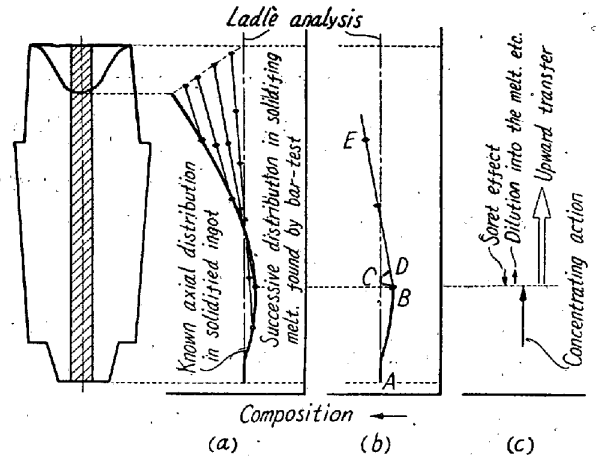


Fig. 3. Forming mechanism of vertical segregation along the core of an ingot.

れずに ABD と滑かに進むが、メルトの中の濃度勾配 BDEがある値よりも大きくなると、上方への移動は濃縮作用と釣合わなくなり、ついにところどころにCのごとき痕跡を残すことになる。しかも第Ⅲ報に述べたごとく、この濃縮の波は凝固の前面からはなれた、BCDよりもさらに上方のメルトの中でも形成されると判断されるのである。

以上の解釈に敷衍してさらにつぎの諸点を付け加えておく。

(1) V偏析と逆偏析の生成機構は連続しており、凝固の初期と後期の差によつて発現の形態が異なるに過ぎない。

(2) V偏析の下端は偏析成分の上方移動と垂直方向凝固速度との関係、従つて鋼塊の大きさによつて位置が異なることになる。第Ⅰ報¹⁾に示したごとく鋼塊が大型になる程凝固高さ一時間曲線の傾斜は緩かとなり、またきわめて大型の鋼塊ではV偏析の下端が押湯側へ移動するのは周知の事実である。(Fig. 4)

(3) 逆偏析域下半部では鋼塊底端より上方に向つて偏析成分は減少して行くが、この

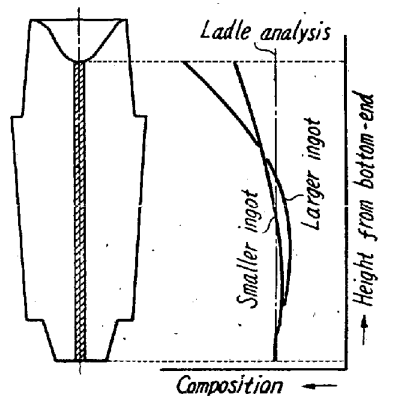


Fig. 4. Axial segregations for larger and smaller ingots.

減少した分は凝固中のメルトの中で鋼塊頂部へと漸増的に移動し続け、一方凝固がある程度進めば側面からの凝固による濃縮も垂畳されるから、逆偏析域の上半部では偏析成分がふたたび増加し始めることも容易に理解され

る。

V: 主要3偏析生成機構の総括的説明

Ⅲ. およびⅣ. の所論を組合せて、3偏析の生成機構を鋼塊内の3次元空間において総合的に考えて見ると、Fig. 5 (a) において

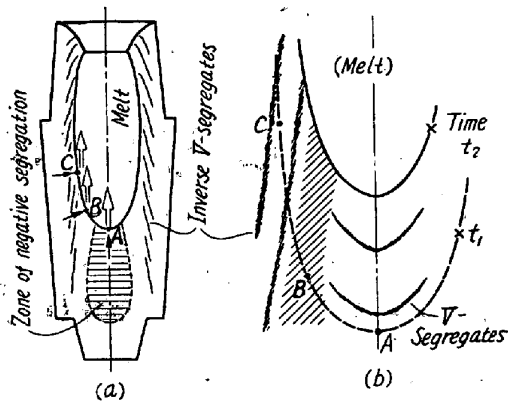


Fig. 5. Segregations successively formed near the liquid-solid interface.

A部: 底部よりの高さに従つて逆偏析またはV偏析が生じ、あるいは逆偏析域にV偏析が重畳して出現する。

B部: 水平方向と垂直方向の中間の方向の凝固の進行と偏析成分の上方移動とを組合せると、凝固面の濃縮痕跡は逆V偏析線のごとく明確とはならず、Fig. 2 (b)のごとく薄く散布される。

C部: 前述のⅢ.のごとくにして逆V偏析線群を生ずると説明され、時刻 t_1 より t_2 へと凝固が進行する間には各偏析はFig. 5 (b)のごとく逐次形成されることになる。

ここで重ねて述べておきたいのは、これらの3偏析は鋼塊全体の偏析の一局部の現象としてFig. 1 (a)に示したごとくに形成される点であり、偏析成分の分布面における鋼塊軸心部下半の凹地として逆偏析が横わり、この凹地より標高が高まつて軸心頂部の断崖へと向う途中において軸心部には周期的にV偏析が現われ、またその側方には逆V偏析線の峯が鋭く並行して現われて凹凸の波を作ると云うのである。

VI. 結 言

第Ⅱ報および第Ⅲ報で明らかにした鋼塊の主要3マクロ偏析の生成におよぼす重力の影響の種々の様相についての観察と実験の結果に基づいて、従来は各偏析に対して個別に行われるに過ぎなかつた生成機構の説明を、鋼塊内の3次元的な凝固の進行に合せて、相互に関連を

持たせつつ有機的に行うことを試みた。

これを要約すればつぎのごとくである。

1) 鋼塊にマクロの偏析を齎すべきいくつかの素因の中で最も影響度が大きいと考えられる凝固の前面のメルトの中への濃縮と重力の作用(軽い成分の対流によらない上方移動)の二つを中心として、鋼塊全体のマクロ偏析の生成過程を考察した。

2) 逆V偏析線群の成因の説明は、英国鉄鋼協会鋼塊不均一性調査委員会の説とほぼ同様である。ただし凝固殻の前面のメルト内に濃縮された偏析成分は1)のごとくにして上方へ移動すると考える。

3) V偏析と逆偏析の生成機構は本質的には同じものと考え得べく、いずれも固液界面のメルト内への濃縮(上向き)が重力の作用によつてどれ程上方へ移動されるかのbalanceの問題であつて、垂直方向濃度勾配が急になる凝固の後半期(高さの中央附近より頂部側)では、垂直方向濃縮の波としてメルトの中にV偏析の萌芽が形成され、これが後にV偏析痕となる、と考えられる。

V偏析と逆偏析とを関係づけるこの説明は本報告における最も重要な主張である。

4) 2)と3)を組合せることによつて、鋼塊縦断面のマクロ偏析の分布面(Fig. 1)における谷あるいは峯としての3偏析の生成過程を総合的に手際よく説明することができる。

本報告は云うまでもなく鋼塊の偏析全体の説明の一試論に過ぎず、例えば逆V偏析線は何故連続したlayerとならずにstringとなるか、V偏析痕の周期性は何故生ずるか、一次晶と偏析との関係の本質は何か、オーステナイト鋼塊とパーライト鋼塊における偏析特性の相異は何に由来するか、など解決すべき多くの問題が残されている。本研究のつぎの段階ではこれら偏析のminor orderの諸問題に関連のある諸事項についての観察と実験とを続ける予定であるが、かくして偏析のmacro, minor, microの各orderの様相が判然とするならば、大型鋼塊の偏析現象ははじめて明確に説明されるであろう。

終りに、本研究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敬意を表すると共に、種々御指導と御討論とを賜わつた室蘭製作所研究部長下田秀夫博士、鍛圧部長館野万吉氏、製鋼部製鋼課長守川平四郎氏の各位に深謝する。(昭和33年9月寄稿)

文 献

1) 守川平四郎, 小野寺真作, 荒木田豊: 鉄と鋼, 44

- No.1 (昭 33—1), p. 9~14
- 2) 守川, 小野寺, 荒木田: 鉄と鋼, 44, No.8 (昭 33—8), p. 872~880
- 3) 守川, 小野寺, 荒木田: 鉄と鋼, 44, No.11 (昭 33—11), p. 1259~1265
- 4) 下田秀夫, 小野寺真作, 徳田 昭: “大型鋼材の変態特性(I), (II)”, 日本金属学会講演大会にて発表, 昭和 32 年 10 月 (戸畑) および昭和33年 4 月 (東京)
- 5) R. Castaing, J. Philibert & C. Crussard: J. Metals, April 1957, p. 389~394
- 6) 7th Rep. Heterogeneity Committee, Iron & Steel Inst., Special Report No.16 (1937), p. 1~14
- 7) 河合正吉: 鉄と鋼, 41 (1955) No.8, p. 854~857; No.10, p. 1090~1092; No.11, p. 1172
- ~1174; No.12, p. 1233~1236; 同 42 (1956), No.1, p. 14~18, p. 19~22; No.2, p.85~88 p. 89~93; No.4 p. 301~306; No.5 p. 383~391
- 8) E. Marburg: J. Metals, Feb. 1953, p. 157~172
- 9) B. Gray: J. Iron & Steel Inst., Vol. 182, Part 4, (April 1956), p. 366~374
- 10) 例えば A. Hayes & J. Chipman: Trans. AIME Vol. 135 (1939), Iron Steel Div., p. 85~132
- 11) C. Wagner: J. Metals, Feb. 1954, p. 154~160
- 12) M. Ballay: Rev. de Mét., XXV (1928), p. 427 et p. 509
- 13) A. W. Porter: Trans. Faraday Soc., 23 (1927) p. 314~316

Timken 16-25-6 の引張り性, 曲げ性と鑄造組織との関係*

(無変態合金鑄塊の鍛造性について—II)

山根 寿巳**・美馬 源次郎***

Relationship between High-Temperature Tensionability and Bendability of as-Cast Structures of Timken 16-25-6

(Forgeability of transformation-free alloy ingots—II)

Toshimi Yamane, and Genjiro Mima

Synopsis:

In the first report, entitled “Forgeability of Transformation-free Alloy Ingots (I)” the authors reported the relationship between the forgeability and as-cast structures, which are a granular structure and columnar one, For the purpose of the auxiliary experiments of the first report, by both impact and static tensile tests and bending tests at high temperature the relationship between tensionability, bendability of as-cast structures of Timken 16-25-6 were studied.

The direction of the tensile stress was parallel to the long axial direction of a columnar (longitudinal), and vertical to it (transversal). Bending directions of the columnar structure were bending stress applies to bend the columnar axis (longitudinal) and applies to does not bend the columnar axis (transversal). Both experiments were performed dynamic and static.

The results were as follows:

(1) The best elongation is obtained in the case of stress is applied to the longitudinal direction and next, the granular structure, the least elongation is obtained when the stress is applied to transversal, in the tensile test.

In the bending test, the best elongation is obtained in the transversal direction, and next, the granular structure, the least elongation is obtained in the longitudinal.

The easy crack forming case is stresses that applied to separate the boundaries of columnar. The static test shows better elongation than dynamic one, in the both experiments.

(3) Working energies until specimens broken, are most in the granular structure, next,

* 昭和 33 年 4 月本会講演大会にて発表 ** 大阪大学工学研究科大学院学生, 工修

*** 大阪大学工学部, 工博