

験の結果から一応侵蝕機構に対する筆者等の見解を述べ併せて現場の造塊作業における侵蝕に言及したが、実験の不備や独断的な推論を下した点多々あると考えられるので大方の御批判、御教示を賜り度い。

終りに本研究の発表を許可せられたる株式会社日本製鋼所常務取締役小林佐三郎博士、室蘭製作所々々長取締役皆川孝光氏に謝意を表すると共に本実験の実施に当り多大の御援助と御指導を賜った技師長泉谷弥一氏並びに実

験の細部にわたつて種々御助言を頂いた北海道大学工学部吉井助教授に厚く御礼申上げる。

なお熱心に協力せられたる研究部曾我政雄氏の労を多とする。(昭和 30 年 5 月寄稿)

#### 文 献

- 1) 中川, 曾我, 鉄と鋼 **39** (1953) 2, 111
- 2) 前川, 中川: 鉄と鋼 **41** (1955) 12, 1237
- 3) 前川, 中川, 曾我: 鉄と鋼 **39** (1953) 5, 493 ]

## 大型炭素鋼鋼塊の $\Lambda$ 偏析帯に就て (II)

### 偏析線の生成機構 (其の 1)

河 合 正 吉\*

## ON THE $\Lambda$ SEGREGATED ZONE OF LARGE CARBON STEEL INGOT (II)

### Mechanism of Formation of the $\Lambda$ Segregated Line. Part-1

Masayoshi Kawai

#### Synopsis:

The author tried to describe the mechanism of formation of the segregates in the  $\Lambda$  segregated zone on the basis of results of the observation about the  $\Lambda$  segregated zone of 20t steel ingots. Impurity-rich drops of molten steel being in contact with the solidified shell tended to float upwards, interrupting growth of dendritic crystals, and some of them obstructed to float became segregated facets.

This obstacle of floating resulted in the  $\Lambda$ -inclination of segregated facet.

Supposing that the segregated line was nothing but the abnormally grown segregated facet, the author described the transformation of segregated facets to lines and the growth of the latter. Finally, mentioning of the solidifying speed, the casting condition, the content of hydrogen in molten steel and the alloying elements as the main factors controlling the formation of segregates, he considered about the effects of each factor.

#### 緒 言

第 1 報において記述した  $\Lambda$  偏析帯の構造に関する諸観察結果に基き、偏析小素面および偏析線の生成機構について考察を加える事とする。特に偏析線の生成機構に関しては、古くより諸大家によつて議論され、数多くの研究も行われてきたが、現在においてもなお定説が得られておらず、諸説紛々たる状態にある。よつて著者はこれ等の諸説に拘泥せず、上述の観察結果のみを唯一の指標として議論を進めてみる事とする。

#### I. 従来の主要なる諸説の概観

上述の様に従来の諸説は議論の進行上余り必要はない

が、一応参考迄にこれ等を概観する事とする。その主なるものを挙げれば次の通りである。

(1) C. Benedicks および英国鉄鋼協会の鋼塊の不均一性の研究小委員会の説:— 鋼塊凝固の際、凝固殻の内側が不純物で富化され(富蝕熔鋼の形成)、これが低比重のために浮揚して細長い偏析線を形成する。従つて偏析線は略々凝固の際の等温面上にある。

(2) 蒔田氏の説:— 等温面に直角な方向に生長する結晶群の共有線に不純物が排泄されて、これが偏析線となる。従つて偏析線は等温面に直角に走る。

(3) A. Hultgren の説:— 樹枝状晶層発達の途中凝固面附近には凝固した樹枝状晶幹枝部と、その間に残留した富蝕熔鋼とより成る pasty zone が形成され、残

\* 三菱製鋼株式会社社長崎製鋼所

留した富触熔鋼が最後に凝固する際に、体積収縮を補うための給湯が不自由となり、給湯抵抗の最も小さい通路を通じて附近の富触熔鋼が吸込まれる（富触熔鋼の浮揚とは全く反対である）事によつて給湯が行われる。この通路を満す富触熔鋼は周囲よりも遅れて凝固し、偏析線となる。

(4) 里井氏の説：— 樹枝状晶層発達途中に樹枝状晶層中に応力を生じてその一部が弛開し、この空隙が附近の富触熔鋼を吸込んで偏析線となる。（角隅偏析生成の機構と全く同一である）。

(5) 気泡偏析説：— リムド鋼塊の中心部および場合によつてはキルド鋼塊の表層部（第1報 Fig. 3 (a) 参照）に所謂気泡偏析が見られる。これと類似の現象が A 偏析帯に生じ、偏析線を生じる。確かに水素含有量の比較的高い熔鋼が、凝固の際に顕著な A 偏析を示すことが知られている。

以上の様に偏析線の理論は今日でもなお暗中摸索の段階にあるのであつて、諸説の間には殆んど共通の論点がなく、むしろ全く反対の立場にあるものが多く、その発展の経路には一定の方向がない。

## II. 諸観察結果の整理

まず第1報で述べた諸観察結果の中、A 偏析帯の生成機構を考察するための拠点となるべきものを要約して掲げる事とする。

### 1. 偏析小素面

① 偏析小素面は樹枝状晶層中で小さな面状をなし、A 傾斜をなして無数に分布する。A 傾斜角は偏析線よりも大である。

② 偏析小素面は樹枝状晶の境界をなす場合が多い。従つて偏析小素面は略々一次晶の径に相当する長さを有する。

③ 偏析小素面は偏析度が大である。

### 2. 偏析線

④ A 偏析帯には偏析線以外に偏析小素面が存在する。

⑤ 偏析線は偏析度が極めて大である。

⑥ 偏析線は下端で細い尾を引き、尾部の形状は偏析小素面に酷似する。

⑦ 偏析線はその外側に接する一次晶に対して遮断効果を呈する。

⑧ 偏析線は断点を有し、そこには特徴的な一次晶が存在する。

⑨ 偏析線中の樹枝状晶は内部より外側に向つて生長した傾向を示す。

⑩ 偏析線中には収縮孔と見做される空隙が存在する。

⑪ 偏析線は略々放射状に排列した数個の一次晶群の中心に位置する。

⑫ 偏析線の極く近傍で偏析小素面の分布がやや粗である。

以下 A 偏析帯の生成機構の考察を進めるに当つて、何等かの結論を導出する際、その結論の根拠となるべき観察結果が例えば偏析線の遮断効果であれば、その結論に⑦と附記する事とする。

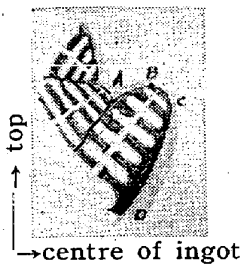
## III. 偏析小素面の生成機構

第1報で略述した様に樹枝状晶の形成は、凝固殻と鋳型壁とが分離して冷却速度が急に低下した時期から始まるものと考えられている。この際前述の様に冷却速度が低いために、凝固面において液固相の平衡関係が近似的にしかも局部的に成立する様になり、接触熔鋼は次第に富化して富触熔鋼となり、樹枝状晶の前面に薄膜状の富触熔鋼が形成されるであろう。しかしてこの富触熔鋼層は鋼塊の軸を軸として略々軸対称に排列するであろう。

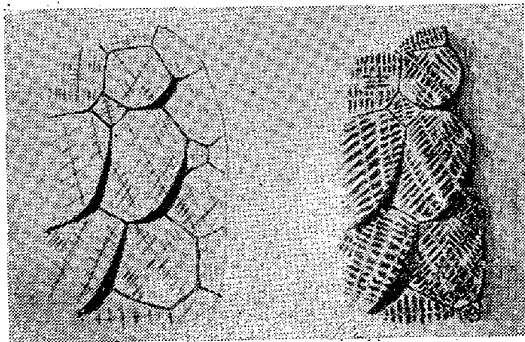
偕である一つの樹枝状晶について考えれば、これが生長するに従つて前面の富触熔鋼は次第にその富化度を増すが、他方内部の熔鋼への不純物の拡散、富触熔鋼の比重が小なるために起る富触熔鋼の浮揚等のために、富化はある程度相殺されるであろう。併しこの相殺効果は比較的小なるために、富触熔鋼の富化度は益々増加し、その結果富触熔鋼の凝固点が低下するために樹枝状晶の生長が妨害されるに至るであろう。即ち樹枝状晶は生長するに従つてその前面の富触熔鋼の富化度の増加のためにその生長速度は次第に小となり、他の結晶の妨害がなくてもその生長が停止する事も起り得るであろう。勿論樹枝状晶の生長停止は結果的に見れば、凡ての場合に他の結晶との衝突によつて起るが、この中には上述の様に富触熔鋼の妨害作用のためにある樹枝状晶の生長が抑制されると、他の結晶の生長速度が相対的に大となり、前者の前面に後者が張出して衝突する場合もあるであろう。また樹枝状晶層が厚くなると自由晶的な発達も盛んになる。即ち富触熔鋼の背後に自由晶が多数発生し、その大部分は下方に行くが、一部は凝固殻に根を下して生長し樹枝状晶の生長を妨害する事も考えられる。

1) F. Bardenheuer, St. u. Ei., 54 (1934), 1073  
C. Sykes, H. H. Burton & C. C. Gegg,  
Jour. Ir. & St. Inst., 156 (1947), 155

以上の様な凝固過程において富触溶鋼は如何なる挙動を採るであろうか？富触溶鋼は樹枝状晶の生長を妨害するから、その近傍の凝固の終期には他の結晶がその背後に張出し、熔融状態のまま結晶間に挟まれて、最後に凝固する事になるであろう。然らばこの膜状の富触溶鋼の痕跡が実際の鋼塊中に存在するであろうか？偏析小素面が正にこれに相当するものであろう。偏析小素面は確かに著しい偏析を示し③、しかも膜片状をなして鋼塊の軸に対して樹枝状晶層中に対称に分布しているのである①。斯様に偏析小素面の存在は偏析線の存在よりも遙かに直観的にしかも自然に理解されるのである。



(a) Condition of solidifying surface



(b) Relation between dendrites and segregated facets in solidification.

Fig. 1. Model figure of process in the formation of segregated facets.

然らば偏析小素面が $\Delta$ 傾斜をなす事は何を物語るものであろうか？富触溶鋼は比重が低いために浮揚する傾向を有する事は前述の通りであるが、更なる富化が進めば硫化物等が析出し、これ等は比重が一層小であるから益々浮揚し易い。従つて今 Fig. 7 (a) の凝固面の模型図について考えると、ABC面の富触溶鋼は浮揚が容易であるから、CD面の夫れよりも遙かに不安定である事が想像される。しかもCD面の富触溶鋼には更に下方から浮揚する富触溶鋼および析出した硫化物等も加わり、一層安定な状態が期待される。この結果CD面の富触溶鋼のみが溶鋼中に残り、これはその生成過程より当然樹枝状晶の境界等になるであろう。しかして厳密な意味ではないが、富触溶鋼の浮揚速度と樹枝状晶の凝固速度との合成された方向が $\Delta$ 傾斜の方向と一致する事が推論さ

れる。①② Fig. 1 (b) は模型的に左方の図の様な凝固殻の形成される途中、上述の様な機構によつて富触溶鋼が $\Delta$ 傾斜をなして残留する情況、即ち偏析小素面の形成される情況を右図で示したものである。

以上の様に偏析小素面の生成は富触溶鋼の浮揚性に着目して極めて自然に理解されるが、逆に $\Delta$ 傾斜をなす偏析小素面が存在するという事実は、その生成機構に関する自然さの故に、富触溶鋼の存在並びにその浮揚性に関する仮定を具体的に裏付けるものという事ができよう。

#### IV. 偏析線の生成機構

##### 1. 偏析小素面より偏析線への転化の可能性

$\Delta$  偏析帯の構成因子としては、従来は偏析線のみが注目されていたが、著者は一層主要なるものとして偏析小素面を挙げたが、これに対しては前述の様な生成機構が考えられたのである。即ち樹枝状晶層発達途中で形成される富触溶鋼の一部は偏析小素面として鋼塊中に残留するのである。他方偏析線の生成も富触溶鋼の形成と何等かの関係を有するものと想像されるから、偏析小素面の生成との関連も当然同時に考慮されるべきである。斯かる思考過程を経れば、偏析線の尾部が偏析小素面に酷似するという観察結果が論議の焦点に浮び、偏析線は偏析小素面の中のあるものが異常に発達したものであるという見解が自然に生れてくるであろう。④⑥ この見解は勿論 $\Delta$ 偏析帯に関する観察結果より一義的に帰納されるものではない。この見解は観察結果と矛盾せず、比較的 plausible であるというに過ぎないが、著者の理論の出発点とその方向とを決定する事になるので、その重要性に鑑み、偏析線の尾部に関する観察例を Fig. 2 に再掲してその妥当性を確める事とする。

上述の見解に従えば、偏析線は偏析小素面に胚胎する事になるが、この偏析小素面より偏析線への転化は如何にして起るであろうか？ まず転化を促進する要因としては、

- i) 富触溶鋼の量および富化度の大きな事
  - (a) 一次晶の大きな事
  - (b) 偏析小素面の合流
- ii) 偏析小素面の伸長の容易なる事
  - (a) 凝固結晶の配置の適当なる事
  - (b) 富触溶鋼等の浮揚が適当に行われる事

等を挙げる事ができる。次にこれ等の要因が如何にして転化の機会を大にし、偏析線が如何にして生長するかについて述べる事とする。

##### 2. 偏析小素面の転化および偏析小素面の生長の機構

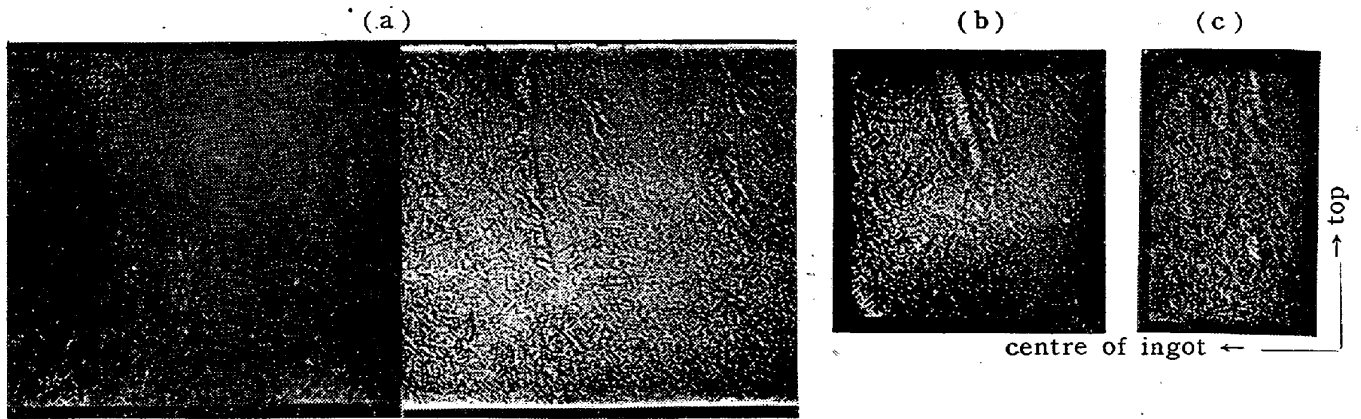


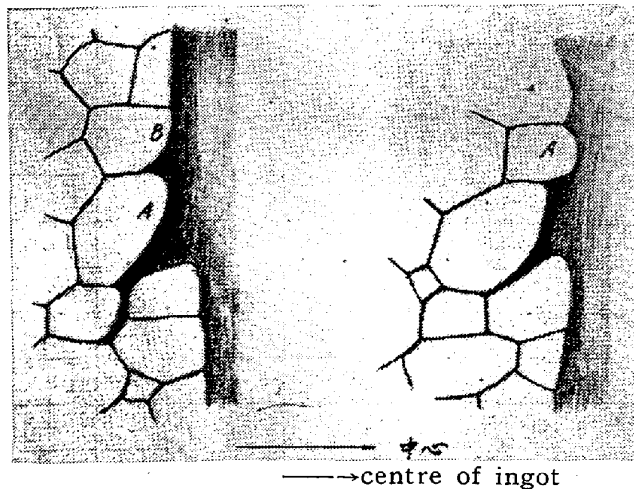
Fig. 2. Condition of the tail of segregated line.

記述を簡明にするために以下の論述を箇条書にする。  
 なお本論に移る前に、前述の様に偏析小素面の存在という事実によりある程度具体的に裏付けされた富触熔鋼の形成並びに浮揚現象と、上述の偏析小素面が偏析線の萌芽であるという見解とに、以下の論述において重要な役割を与えた事を前おきしておく。

(1) まず一次品の大なる事は偏析小素面の大なる事を意味する。② よつて一次品が大きければ富触熔鋼の量も多く、結晶核の発生速度も小であるから偏析度も大となり、偏析小素面より偏析線への転化の機会にも恵まれる事になる。

(2) 偏析小素面の合流も同様な意味において、転化の傾向を大にするであろう。③

(3) Fig. 3 において (a) の想像図は偏析線小素面が合流し、更にその上方の結晶 A, B 等の配置が、富触熔鋼の緩慢なる上昇を束縛しない状態を示すものである。しかしてこの状態が偏析線への転化に第一歩を踏出



(a) Suitable condition for transformation (b) Unsuitable condition for transformation

Fig. 3. Imaginary picture of arrangement of solidifying crystals above segregated facets.

した状態に相当するものと考えられる。他方 (b) は A 結晶が下方の富触熔鋼の浮揚を妨害し、偏析線への転化を困難ならしめている状態を示すものである。

(4) Fig. 3 (a) の様な状態が成立すれば、富触熔鋼は偏析小素面としての小成に甘んぜず、その一部は凝固面に沿つて上昇し、他方富触熔鋼中に析出した硫化物等は比重が更に小なるために、一層速かに上昇する。

(5) これ等の析出物は速かに上部の接触熔鋼に移行しその接触熔鋼の富化度が小ならば再溶解してその部分の富化度を増加させる。その結果該部の接触熔鋼は凝固点が低下して接触凝固相の生長を妨害しつつ、遅れて上昇してくる下方の富触熔鋼 (析出物の母体) の一部と合体し、その富化度は益々増加する。詰り富触熔鋼中の析出物は、偏析小素面より偏析線への転化並びに偏析線の生長に際し、いわば尖兵的な役割りを果す事になる。また若し上部の接触熔鋼の富化度が大きければ析出物は更に上昇して同様な役割りを果すであろう。

(6) 斯様な過程を経過すれば、富触熔鋼の形状は薄い面より太い線に変つて行くであろう。

(7) 斯様な線状の富触熔鋼と正面で接触する結晶は生長を停止し、その結晶乃至は隣接結晶はこれを迂回して生長し、終りに固凝中の鋼塊の横断面においては、液

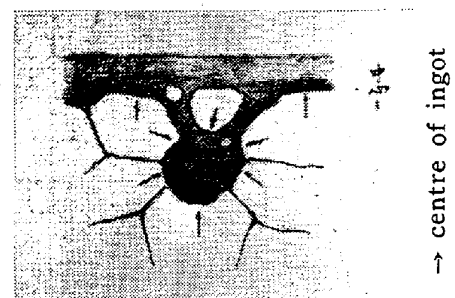


Fig. 4. Imaginary picture for surroundings of segregated molten steel-line in transversal section of a solidifying steel ingot.

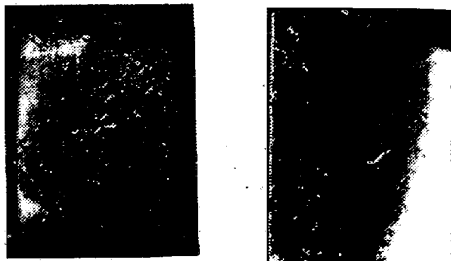
固境界で Fig. 4. の様な状態を呈するに至るであろう。図中矢印は結晶の生長方向を示す。斯くして線状の富触熔鋼は略々放射状に排列する多数の結晶に取巻かれ、これ等の結晶が生長するに従つて熔鋼線の径は細くなるがその富化度は益々増加する。⑪。

(8) 斯くして偏析小素面はいわば偏析線の萌芽の役割りを果し、漸次形成されて行く線状の富触熔鋼は途中で形成されつつある偏析小素面となるべき富触熔鋼をも併合し、これを取巻く周囲の結晶群から排泄される不純物を加えつつその量を増し、更に上方へ浮揚する富触熔鋼および析出不純物の豊富な供給源となり、偏析線となるべき富触熔鋼線を益々上方へ延長させる。

(9) この際富化熔鋼線は凝固殻の横方向への生長速度と富触熔鋼の浮揚速度とが合成された方向に伸びる筈である。これが  $\lambda$  傾斜の現われる原因と考えられる。

(10) 従つて偏析線の  $\lambda$  傾斜の小なる事は、富触熔鋼の浮揚速度が凝固殻の生長速度に比して極めて大である事を意味する。他方偏析線について観察された遮断効果はこの推論をよく裏書きしている。⑦

(11) 樹枝状晶層深部においては、富触熔鋼の浮揚が活発な自由晶の生成、熔鋼の粘性の増加等の影響のために相対的に遅くなり  $\lambda$  傾斜が大となるであろう。(Fig. 5 左図および第 1 報 Fig. 1 参照)



→ centre of ingot ←

Fig. 5. Condition of the top of segregated line.

(12) 富触熔鋼の浮揚速度は偏析度が大きなる程、また量が多い程大きくなるであろう。偏析線が下部に行くに従つて傾斜角が増加するのはこの影響によるものであろう。

(13) 偏析線の遮断効果により接触凝固相の発達が停止しても、遮断効果が比較的微弱な場合には遮断面の各所に結晶核を生じ、これ等が富触熔鋼中で生長する事も

考えられる。然る時結晶には富触熔鋼の生長妨害のために偏析小素面と同程度の傾斜をなす下縁を生じ、多数の斜行する一次晶を生じ易い。⑧ また斯様な凝固面に沿つて異常に伸びた富触熔鋼が偏析線分枝を形成する。

(14) 斯くする中に浮揚しつつある富触熔鋼が、偶々上方で突出した結晶に衝突すると、完全に堰止められる場合と、富触熔鋼の一部がこの結晶を迂回して再び浮揚を続ける場合とが起る。Fig. 5 の偏析線の頂点は前者の場合を示すものである。後者の場合には、再びこの浮揚線の延長線上に戻る場合(この場合にも一種の断点を生ずる)、同一鉛直面<sup>2)</sup>上で方向を変化する場合、他の鉛直面上に移る場合等が考えられるが、富触熔鋼線は早晚生長を停止する筈である。

(15) 偏析線となるべき富触熔鋼線は斯様にして完成されるが、凝固点が低いために Fig. 4 の様にその周囲が凝固しても依然として熔融状態を保ち⑤、その背後で内部の熔鋼と連絡しながら次第に凝固するが、凝固の末期には凝固による体積の収縮を補うべき給湯は、恐らく極めて狭隘となつた背後の通路を通じて行われるであろう。若し給湯が不十分ならば収縮孔を生じ、しかも偏析線は下部より凝固するであろうから、空隙は偏析線の頂部乃至は断点直下に生ずる傾向のある事が推論される。⑩

(15) 偏析線においては、外側の偏析度が最大になるから、その遮断効果は最大であり、偏析線中の樹枝状晶は内部より外側に向つて生長する傾向を有するであろう。⑨

以上の様に著者の理論は結果的に見れば、C. Benedicks 等の説の系統に属する事になるが、著者は、従来富触熔鋼の形成並びに浮揚現象が単なる仮説として前提されていたのに対し、樹枝状晶層に多数の偏析小素面が存在するという事実に着目して上述の仮説の具体性を把握し、 $\lambda$  偏析帯に関する諸観察結果に基づき、偏析小素面が偏析線の萌芽となるべき可能性を捉えて、偏析小素面より偏析線への転化並びに偏析線の生長の機構を記述したのである。(昭和 30 年 3 月寄稿)

## 2) 鋼塊の軸と浮揚線とを含む鉛直面の意