

大型鋼塊における V 偏析について (II)*

河 合 正 吉**

ON THE V-SEGREGATES OF LARGE STEEL INGOTS

Masayoshi Kawai

Synopsis:

Refer to "Tetsu-to-Hagané" vol. 43 (1957), No. 4, p. 431.

IV. V 偏析の V 傾斜角

鋼塊の縦断面に現われた V 偏析を観察すると、各 V 偏析部の傾斜角は、V 偏析部自身の形状の不規則性による誤差を考慮すれば、その位置によらずほぼ一定と見做される場合が多い。よつてこの傾斜角を鋼塊の特性に関連するものと見做して、特に V 傾斜角と呼ぶこととする。種々の鋼塊について V 偏析を比較すると、この V 傾斜角は鋼塊の形状、大きさおよび鋼種、精錬および造塊条件等によつて異なるように思われる。

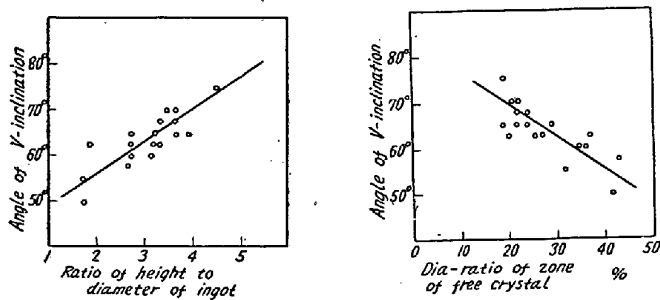
著者は手許にあつたデータを整理して、Fig. 9 に示すような、V 傾斜角と鋼塊の高径比および自由晶帯径比（自由晶帯の平均径の鋼塊の平均径に対する 100 分比）との間の強い相関関係の存在することを知つた。これに対

して高径比と自由晶帯径比との間の相関は、Fig. 10 に示すように比較的弱い。この事実をその儘正直に受取れば高径比と自由晶帯径比とは完全に無関係ではないが、両者はある程度独立に V 傾斜角に影響をおよぼしていることになる。

さて Fig. 9 (a) より高径比が大なる程 V 傾斜角は大となる。この事実は次のようにして比較的自然的に記述される。すなわち同一の径で高さの異なる鋼塊を考え、他の条件を全く同一とすれば、溶鋼底部への自由晶の供給源たる側面の凝固面の面積は高径比が大なる程大である。簡単な為この凝固面単位面積当り単位時間に発生する自由晶の数を一定とすれば、溶鋼周辺に沿つて沈下する自由晶の量は高径比が大なる程多くなり、前述の堆積面の定常傾斜角、換言すれば V 傾斜角は必然的に増加するであろう。

次に自由晶帯径比を左右すべき諸因子については、まだ断片的な知識しかえられているに過ぎないが、例えば鑄込温度が高いと、経験的に自由晶帯径比の低くなることが知られている。然る時は溶鋼の体積に比し相対的に自由晶発生面の面積が増大し、高径比の大なる場合と同様な効果が期待されるのである。

次に特に高径比の V 傾斜角におよぼす影響を、鋼塊の底面および側面からの冷却効果の相対的關係という見地から眺めてみることにする。まず極端な場合として底面からの凝固が完全に阻止された場合の凝固を考えてみることにする。若しこの場合に、鋼塊にテーパがなく、側面からの自由晶の沈下堆積も起らないものとすれば、鋼塊の軸上における縦凝固曲線は Fig. 11 の OAB で表されるであろう。すなわち横凝固のみによつて鋼塊の凝固が達成されるために、軸上における縦凝固は全く行われず、最後の瞬間に鋼塊を貫く軸心上の凝固が行われるために、無限大の縦凝固速度が現れるのである。併し実験の場合には側面からの自由晶の沈下堆積が起るから、凝



(a) Ratio of height to diameter of ingot (b) Dia-ratio of zone of free crystall

Fig. 9. Correlations between angle of V-inclination and some factors.

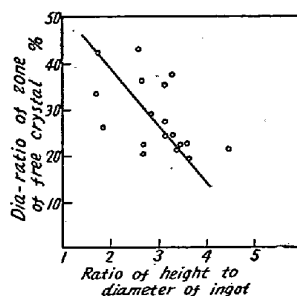


Fig. 10. Correlation between ratio of height to diameter of ingot and dia-ratio of zone of free crystal.

* 昭和 25 年 9 月本会講演大会(札幌)市にて発表

** 三菱製鋼長崎製鋼所

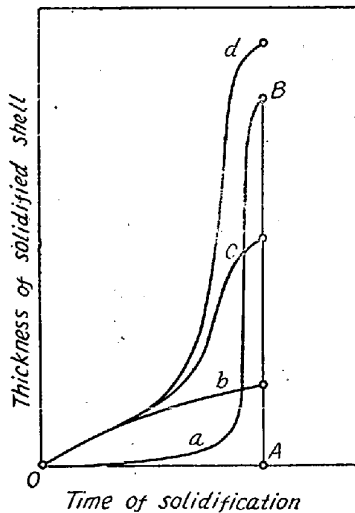


Fig. 11. Schematic progress of vertical solidification along axis of ingot.

縦凝固速度は漸次低下する傾向を示す。而してこれ等両極端の場合はそれぞれ高径比が無限大および無限小の場合に類似するであろう。これ等両極端の場合と Fig. 4 の実例とを対比して、実用鋼塊における縦凝固曲線に対する高径比の影響を定性的に示せば、Fig. 11 において高径比小なる場合の縦凝固曲線を曲線 c とすれば、高径比大なる場合のそれは曲線 d となるであろう。従つて径が等しければ高径比が大なる程、自由晶帯形成時の縦凝固速度は増大するが、この傾向は前述の側面の自由晶の発生面積に関する考察の結果と矛盾しない。

次に E. Marburg の実験結果⁸⁾によれば、自由晶帯形成時と推定される時期の横凝固速度は鋼塊の位置によらずほぼ一定しており、縦凝固に関しては軸上の測定しか行われていないが、縦凝固速度も自由晶帯形成の全過程を通じて定速を示している。すなわち自由晶帯形成時には縦凝固速度の横凝固速度に対する比がほぼ一定であることが知られる。従つてこの場合に凝固が沈下する自由晶によつて定常傾斜角をなす堆積面が形成されつゝ進行するものとすれば、V 傾斜角の正弦は正にこの速度比を表すことになるであろう。この自由晶帯形成時における縦横凝固速度の不変性は、V 傾斜角が鋼塊の位置によらずにほぼ一定していることと表裏をなすことが判つたが、この両速度の不変性の理論的記述に関しては、著者は未だ定見を得るに至っていない。よつて蛇足として極めて定性的な見解を附加すれば次の通りである。すなわち両速度の不変性は、側面より底部への自由晶の供給速

度曲線は修正されて Fig. 11 曲線 a のようになるであろうが、凝固終期における縦凝固の急激な増加は同様に現れるであろう。これに対して側面よりの凝固が完全に阻止された場合の縦凝固を考えればその際の縦凝固は傾斜的に(2)式すなわち

$$t = (d/a)^2$$

によつて表されるであろう。これを Fig. 11 における曲線 b で表すこととする。すなわち

度の不変性を意味するものと考えられることができる。しかしてこの自由晶の供給速度の不変性を、凝固の進行に伴つて生ずる自由晶の発生面積の減少と、溶鋼の温度降下による自由晶の発生速度の増加との相殺の結果と解釈するのである。

終りに以上の考察の応用として、既述の自由晶に伴う中心部への崩落現象の型式に関する検討を行うこととする。著者は前述のように自由晶の堆積は、息角傾斜をなす安定部とその上で上方よりの自由晶の供給速度によつて定まる定常傾斜角(息角より大である。)をなし、中心部に崩落しつゝある層とより成るものと仮定し、V 傾斜角と高径比との間の関係をほぼ矛盾なく記述し得ることを示した。これに対して不連続的な崩落の生起を仮定すれば、次のような堆積過程を考えなければならない。すなわち自由晶の堆積は安定な息角傾斜をなす部分と、その上縁部に形成される準安定部とより成り、準安定部は次第に増大してある限度に達すれば不連続的に中心部に崩落し、新たな息角傾斜を形成し、再び準安定部の堆積が始まるという過程を繰返すことになるであろう。かような堆積過程が起るか否かは別として、仮に実現するものとし、B. Grag が仮定したように不連続的な崩落時に惹起される bridging が V 偏析部を結果するものとするれば、V 傾斜角は息角とほぼ一致することになるであろう。この際息角は主として溶鋼および自由晶の特性によつて定まるものと考えられるから、高径比のような幾何学的条件との相関関係を考えることは不可能になるであろう。

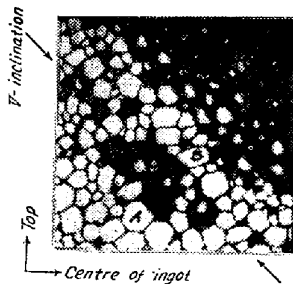
V. V 偏析並びにこれに伴う欠陥の制御

緒言で述べたように本研究はまだその途上にあり、V 偏析ならびにこれに伴う欠陥が、製造条件によつて如何に制御されるかについて論述する段階には至っていないが、一応参考までに極めて断片的な著者の憶測を記すこととする。なお本論に這入る前に、欠陥発生の危険性の最も大なる偏析塊の凝固過程について考察することとする。

(1) 偏析塊の凝固過程

V 偏析部には樹枝状晶より成る偏析塊が存在し、ここには C, P, S の顕著な偏析がみられることは前述の通りである。しかして偏析塊における S の偏析は多量の硫化物の存在と同意義であり、それ等が欠陥と見做される許りでなく、さらに重大な欠陥として Fig. 6 のような収縮孔と見做される空隙の現れることがある。詰りかような偏析塊は、A 偏析における偏析線とは分布ならびに

形状こそ異なるが、実質的にはほぼ同様な欠陥の危険性を包蔵していることになるのである。以下主として空隙の生因を探究するため、偏析塊の凝固過程について考察することとする。



A: Main solidified shell,
B: Solidified shell of bridging,
C: Pool of segregated molten steel,
M: Main molten steel

Fig. 12. Imaginary picture of solidification at the bridging.

さてV偏析の生成過程の考察より、偏析塊は富触溶鋼の背後に bridging が起ることによつて形成されることになる。斯様な情況の想像図を Fig. 12 に示す。著者はこの bridging 生起の素因を富触溶鋼の特性に求めたが、これを促進する二次的な原因としては、例えば前述の中心部に向つて定常的に崩落する自由晶、水素気泡の発生、堆積面における偶発的な凹凸部の形成等が考えられる。Fig. 12 の状態よりさらに凝固が進めばbridging 層Bは、これを構成する自由晶間の凝固の進行および沈下し来る自由晶の堆積とにより、層厚と不透過性を増し、C部の給湯は次第に困難となるであろう。C部の凝固が完了するまで給湯が継続すれば、C部には偏析のみが現れるが、給湯が中断されれば収縮孔としての空隙が生ずるであろう。

次にC部の凝固経過について二、三の憶測を試みることにする。まずA部においては凝固濃に根を下した結晶は樹枝状的な生長を行い、その生長の途中には幾何学的条件により富触溶鋼の妨害を受けることも少く、またB層の存在のために沈下してくる自由晶の妨害もないから上方への生長を自由に行うであろう。これに対してB層の下面には安定な富化が起り、B層下面の結晶の下方への生長はこの富化層によりいちじるしい障害を受けるであろう。この状態を Fig. 13 (a) に示す。図中黒色部は富化層を示すものである。C部は凝固の進行に伴つて収縮し、かつ富化度を増し、さらに溶鋼の一部はその周囲の凝固濃を形成する結晶間の凝固に伴う収縮の補充にも費されるから、給湯が中断されれば当然B層直下に収縮

孔としての空隙が生ずる筈である。Fig. 13 (b) はC部の凝固完了後にかような空隙の生じた情況を示すものである。Fig. 6 に示した実例はかかる凝固過程の実現性を如実に示すものであろう。

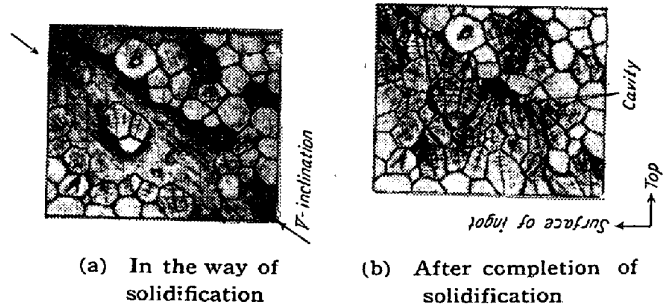


Fig. 13. Imaginary picture of solidifying process of molten steel C.

別にB層の下面で空隙を生じない部分に残留した富化層およびC部中の樹枝状晶の生長に伴つて生じた富化溶鋼の痕跡は偏析小素面となつて現れるであろう。また沈澱晶帯および自由晶帯中には、かような顕著な偏析部としての偏析塊でなくても、全面的に微細な偏析溶鋼のpoolが凝固層に挟まれて凝固する箇所もあるから、これらに伴つて偏析小素面が現れることもあろう。しかしてこれ等の小素面は、V偏析における幾何学的条件により大部分がV傾斜をなすであろう。

(2) V偏析の制御

V偏析は著者の理論によれば側面に生じた自由晶の沈下堆積と深い関係を有する。しからば側面の冷却効果を低下させて、自由晶の発生を抑制すればいかなる結果を生ずるであろうか。

Fig. 14 は前述の A. Kriz が砂型鑄型に鑄込んだ鋼塊の縦断面の硫黄写真であるが、図によれば普通の鋼塊にみられる鋭いV偏析は全く存在しないことが判る。また鋼塊の中心部に微かにみられるV偏析様の偏析は自由晶の堆積面というより寧ろ自由晶の堆積が起らない場合に生ずると予想される等温面の痕跡を示しているように見える。この実験結果は側面の冷却効果が

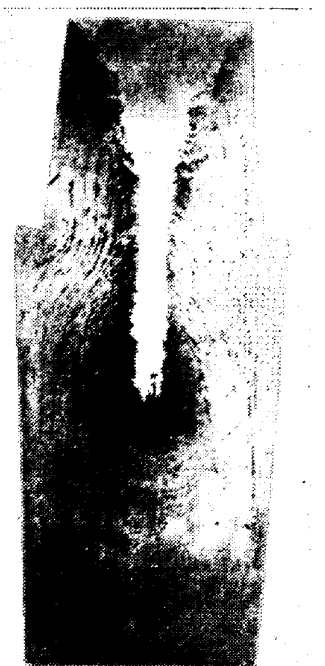


Fig. 14. Sulphur print of longitudinal section of a 30t steel ingot cast in sand mold.

V状の偏析の形成に重大なる意義を有することを実証すると同時に、自由晶の堆積現象に関する具体的な示唆を与えるものといふことができよう。

次に前述の考察により、鋼塊の高径比がV偏析の生成に対して支配的な影響をおよぼすことが判つた。すなわち高径比が大なる程V傾斜角が大となり、大なる傾斜角はまた自由晶帯形成時の縦凝固速度の大なることと同意義である。この高径比の増加に伴う縦凝固速度の増大は勿論底面の冷却効果によつて生ずるものではなく、側面の冷却効果の相対的な増加によるものであろう。従来の経験ならびに W. Martin 等の観測結果より、縦凝固速度が過大になれば、V偏析に空隙を伴う危険が増大し甚しい場合には機械的な bridging の生起により二次パイプを生ずるに至るであろうことが推論される。確かに縦凝固速度の大なることは中心部へ崩落する自由晶の量の多いことを意味し、bridging を生ずれば bridging 層の厚さは急激に厚くなるから、bridging された富触溶鋼部への給湯が困難になり、容易に空隙が形成されるであろう。また崩落する自由晶の多いことは、bridging 現象そのものを誘発し易く、空隙発生危険性を増大せしめるであろう。他方高径比の大なる必然的結果として、自由晶帯形成時に細長い溶鋼を生ぜしめ、凝固面の偶発的な変動により、機械的な bridging としての二次パイプ発生危険性も考えられるであろう。

同様な意味において高温鋳込もまたV偏析を顕著ならしめ、空隙の発生する危険性を増大せしめるであろう。なお著者の乏しい経験によれば、含 Ni 鋼鋼塊では柱状晶および樹枝状晶層の厚さが大となり、自由晶帯径比の減少する傾向がみられる。他方含 Ni 鋼鋼塊の芯部にはザクきずの発生し易いことが知られているが、上述の考察と照合すれば、その一因として、如上の凝固特性を挙げても必しも不合理ではなからう。また精錬において溶鋼が過脱酸された場合にも、自由晶帯径比が低下する傾向が認められているが、この場合にはさらに溶鋼中の水素含有量の増加する危険も考えられるから、V偏析部中の欠陥発生の可能性は、次に述べるように一層大となるであろう。

さて溶鋼中の水素が Δ 偏析形成の際に重大な役割りを演ずることは既報の通りであるが、V偏析の場合にも、水素の役割りはその重要さにおいて Δ 偏析の場合に劣るものではない。溶鋼中の水素は自由晶帯径比を小ならしめる効果を有し、それ自体としてV偏析部における空隙発生直接的原因となる許りでなく、bridging された溶鋼の凝固過程において水素気泡が発生すれば、bridg-

ing 層の下面を閉塞し、給湯を妨害して収縮孔の発生を容易ならしめるであろう。しかも鋼塊の芯部においては凝固の進行に伴う水素の富化は最大限に達するであろうから、水素の害の甚しいことは当然予想されるところであり、凝固過程中心に起る水素気泡の発生が、直接bridging を惹起せしめるかも知れない。この意味においてV偏析を一種の気泡偏析と見做すことも不合理ではないかも知れない。またかような水素含有量の増加した溶鋼の凝固においては、巨視的な偏析部のみならず、自由晶の粒界にも弛開を生ずる危険性が大であろう。

以上のような欠陥は造塊後の鍛錬によつて消失することもあり、また小空隙乃至は割れとして残留することもある。しかして鍛錬後に残留する場合には、欠陥の性状は既報の Δ 偏析線に現れる偏析きずに類似するであろう。

著者は各種の鍛鋼品について斯様な欠陥の存在を確認している。たゞ Δ 偏析における偏析きずが殆んど例外なく偏析線に伴つて現れるのに対し、前述の理由により如上の欠陥には顕著な偏析部を伴わないものもある点に相違が認められる。また鍛造効果は鋼塊の芯部程効き難いから、これ等の欠陥は同一の大きさの偏析線欠陥よりも消失し難い点に留意しなければならない。なおこれ等の欠陥は偏析きずの場合と同様に鍛錬によつて拡大されることもある許りでなく、鋼塊の中心部に存在するためにその周囲は水素含有量も高く、かつ水素は逸出し難いから鍛錬後、冷却時に欠陥中に析出した水素の圧力ならびに水素脆化により、欠陥の拡大される危険性は偏析きずの場合よりも大であろう。

終りに自由晶の堆積を機械的に制御することに関する著者の憶測を附加する。これに概当する実験として L. Northcott の造塊中の鋼棒による攪拌実験⁹⁾を挙げる事ができる。併しこの場合には、鋼塊の径が小なるために、自由晶帯形成時まで攪拌を続けることが不可能となり著者の期待するような効果は実現されていない。しかも斯様な方法では鋼棒による冷却効果が重畳して現れるから純粋な機械的効果のみを与えることは不可能であろう。併し方法としては最も簡単であるから、適当な条件を選べば少くとも傾向的には自由晶の堆積におよぼす影響を察知することができるであろう。理想的な方法としては、鋼塊の自由晶帯形成時に鋼塊に適当な振動を与えることが考えられるが、この方法にも実施上の多くの困難を伴うであろう。併しここでは斯様な実験方法の実現性に関する議論は保留し、仮に実現し得たとすればいか

9) Jour. Iron & Steel Inst., 143 (1941), No. 1, 49

なる効果が期待されるであろうか？ 著者の自由品の堆積の理論を前提とすれば、堆積面の定常傾斜角は減少するであろう。従つてV偏析に関しては好ましい効果が期待されることになる。しかし附与条件を適当に選ばなければ、却つて bridging 等を惹起する危険も懸念される。

(3) V偏析の欠陥防止対策

以上の考察に基いて鍛鋼品を製造する場合に、V偏折および空隙を軽減するために講ずべき普通の対策に関して、著者の見解を概括的に纏めれば、

- i) 溶鋼の過脱酸を避け、可及的に水素含有量を低くする。
- ii) 高径比を適当に小ならしめ、場合によつては鋼塊のテーパを適当に大にする¹⁰⁾
- iii) ii) と相通ずる点があるが、側面の冷却効果を小ならしめる。また場合によつては底部の冷却効果を大にする。
- iv) 鑄込温度は低目とする。
- v) 鍛造の際に鋼塊の芯部にまで鍛造効果がおよぶような成形方法および道具を選択する。
- vi) その他に関しては偏析きずの防止対策と同様である。

という、謂わば自明の理ともいふべき結論に到達する。勿論特殊な対策としては他にも考えられるが、本研究の段階においてはこれ等に言及することは行過ぎと思われるので、この程度に留めることとする。なお上述の結論は、高径比に関する条件を除けば、 Δ 偏析の場合の欠陥防止対策とほぼ完全に一致する。よつて鋼塊全体としての偏析の害を軽減するためには、高径比に関する限り両対策の要求を同時に満足することは不可能であるから、ある範囲内で製造されるべき鍛鋼品の使用条件を考慮して決定する他はない。斯様な条件の下に、なお且些少なるともV偏折を軽減せんとすれば、例えば鋼塊のテーパ

ーを大にするとか、あるいは底面の冷却効果を大にするとかいふような補助手段を講ずることが必要になるのである。

VI. 結 言

まず鋼塊底部の凝固過程に注目し、その部分のマクロ組織を観察して、側面に比して樹枝状晶層の発達が著しく不良であるという興味ある事実に気附いた。これに基いて、鋼塊の凝固過程において、樹枝状晶層の形成開始直後より、凝固殻前面における自由品の発生が相当激しく起るべきことを推論し、沈澱品および自由品帯形成時の凝固は主として自由品の堆積によつて進行することを記述した。就中自由品帯形成時には堆積は主として側面の凝固殻の前面に発生する自由品によつて行われ、この際堆積面はその自由品の供給速度によつて定まる定常傾斜角とも称すべき勾配を有する逆円錐面を形成し、富触溶鋼の存在の下にこの面にほぼ平行に偏析の生ずることを論じ、これがV偏析に他ならぬことを結論した。また実績にみられるV偏析のV傾斜角と、鋼塊の高径比および自由品帯径比との間に存在する密接な関係が著者の理論によつてほぼ矛盾なく記述されることを示した。他方V偏析の調査により、顕著な偏析部の分布することを確認し、これに偏析塊なる名称を与えたが、この部分は偏析を伴う許りでなく、 Δ 偏析の偏析線と同様に空隙を伴うことを知つた。しかしてこの偏析塊の形成は、富触溶鋼の特性を素因とし、さらに他の二次的な因子の介入により堆積過程に生ずべき bridging の結果として記述した。偏析塊における空隙発生の可能性は、この記述の中に自然に包含されることになるのである。さらに考察の結果の応用として、V偏析と製造条件との間の関係について簡単な論述を行い、欠陥防止対策に対する著者の見解を附加した。

終りに本研究に対して御指導を賜つた三菱製鋼常務取締役岡田知彦氏ならびに調査に協力された三菱製鋼長崎製鋼所技術部の方々に深甚なる感謝の意を表する次第である。(昭和 31 年 7 月寄稿)

10) 鋼塊のテーパを大にすることは、その冷却効果におよぼす影響より考えれば、実質的には高径比を小にすることと同様な効果を与えるであろう。