

## 論 文

UDC 621.746.048 : 620.192.45 : 621.746.51 : 620.184.4

## 連鑄々片の凝固組織と非金属介在物の挙動について\*

田阪 興\*\*・伊藤 幸良\*\*\*・前出 弘文\*\*\*

On the Behavior of  $Al_2O_3$  Clusters during the Solidification of Continuously Cast Slabs

Kō TASAKA, Yukiyoishi ITOH, and Hirobumi MAEDE

## Synopsis:

In the slabs of Al-Si killed steel cast continuously by the vertical-type caster, some  $Al_2O_3$  clusters accumulate below the slab surface. By investigation on the macro- and micro-structures of slabs, it was clarified that the  $Al_2O_3$  clusters were entrapped when the columnar dendrite grew discontinuously.

This discontinuity has been improved by the control of the casting temperature. Then, the defect originated from the non-metallic inclusions at welds of ERW pipe, especially that with large thickness and small diameter, has been reduced.

## 1. 緒 言

連続鑄造鑄片は鋼塊とは異なつた凝固条件にあるために、その内部性状も種々の特徴を現わす。そのため品質上も連鑄材特有の問題があり、多くの研究がなされてきている<sup>1)</sup>。とくに、非金属介在物の挙動については、円弧型連鑄機で製造される鑄片の円弧の内面に相当する部分に大型非金属介在物が集積することがよく知られている<sup>2)3)</sup>。その低減策のために、連鑄機の曲げ半径、溶鋼の流動状況との関係などが検討されている<sup>2)~6)</sup>。

一方、垂直型連鑄機で製造された鑄片においても、鑄片表面から 10~40 mm の位置に非金属介在物の集積が現われる。この垂直型連鑄機の場合の非金属介在物の集積は、円弧型連鑄機の場合と比較すると非金属介在物も小型であり、集積程度も軽微である。しかしながら、厚肉小径の電縫鋼管素材などでは、この非金属介在物集積部がビード切削部に露出してくるために、フッククラックなどの溶接部欠陥の原因となる。

本報告では、垂直型連鑄機で製造された鑄片の非金属介在物の分布の特徴を明らかにし、その特徴的な挙動と連鑄材の凝固組織との関係を検討した。

## 2. 供試材および調査方法

供試材として、室蘭製鉄所の垂直型連鑄機で製造した Al-Si キルド鋼鑄片および同鑄片を素材とした自動車用

厚肉小径電縫鋼管を用いた。鑄片の鑄造条件の概要とその化学組成を Table 1 に示した。また、電縫鋼管の造管条件は Table 2 に示すとおりである。

電縫鋼管欠陥部は、顕微鏡観察の後、X線マイクロアナライザーによる欠陥部介在物の同定を行なつた。また、溶接部近傍のメタルフローの調査は、「ピクリン酸アルコール+表面活性剤」腐蝕液によつて腐蝕し、顕微鏡で観察した。

鑄片の非金属介在物の調査は、鑄片横断面でのサルファープリント、目視による地疵検査、顕微鏡による清浄度の測定と群落状  $Al_2O_3$  の分布測定などによつた。

凝固組織の調査は、温塩酸法によるマクロ組織の観察、およびオーバーホフナー氏液による腐蝕後の工具顕微鏡を用いた 2 次デンドライトアーム間隔の測定などを行なつた。

## 3. 調査結果

## 3.1 電縫鋼管溶接部欠陥の原因

電縫鋼管の溶接部欠陥の中で、連鑄材を素材とした厚肉小径管に特徴的に発生し、磁粉探傷検査で検出される欠陥がある。この欠陥は、電縫鋼管の溶接ビードの切削部分に溶接々合線の近くで、これに沿つて線状に現われる。

Photo. 1 に欠陥部を横断面で切断し、検鏡した結果の代表例を示した。研磨のままの状態ではいずれの場合に

\* 昭和 46 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 51 年 7 月 9 日受付 (Received July 9, 1976)

\*\* 新日本製鉄(株)製品技術研究所 (Products R &amp; D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

\*\*\* 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

Table 1. Casting conditions and chemical compositions.

Ladle analysis (%)	C	Si	Mn	P	S	Sol. Al
	0.15~0.24	0.13~0.35	0.44~0.67	0.012~0.026	0.003~0.016	0.010~0.057
Slab size (mm)	Width : 900~1 000, Thickness : 150~200					
Casting speed (m/min)	0.5~0.7					
Temperature in tundish (°C)	1 535~1 565					
Specific cooling water (l/kg)	0.8					

Table 2. Tubing conditions.

Type of welding	High frequency induction resistance welding
Tube size diameter (mm)	47.6~48.6
thickness (mm)	2.3~5.1
Welding power control voltage (V)	10 000
ampere (A)	12~17
speed (m/min)	27~43

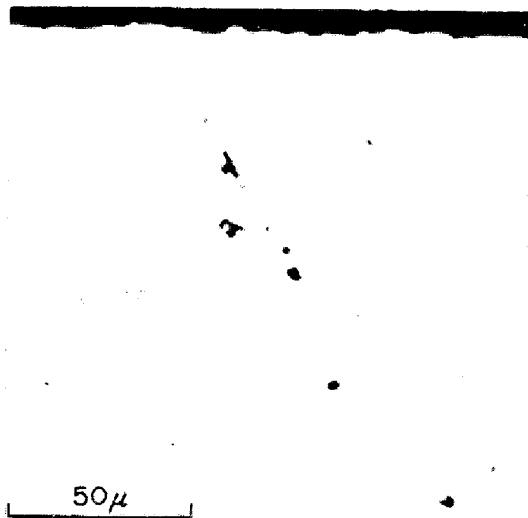


Photo. 1. Typical inclusions in magnafux defects.

も、小さな介在物が連鎖状に存在し、この介在物を縫つてクラックの伝播が認められる。この介在物のX線マイクロアナライザーによる主要元素の特性X線像をPhoto. 2に示した。Al および O 以外の成分は検出されず、 $Al_2O_3$  単味の非金属介在物が欠陥の原因であることが明瞭である。

一般に、高周波誘導溶接や高周波抵抗溶接などによる電縫鋼管では、大型の非金属介在物に起因するフッククラックや超音波探傷欠陥の発生が重要な問題の一つであり、種々検討がなされているが<sup>7)8)</sup>、ここに示した磁粉探傷欠陥は非常に小型の  $Al_2O_3$  介在物までが欠陥の原因となつていることが特徴である。

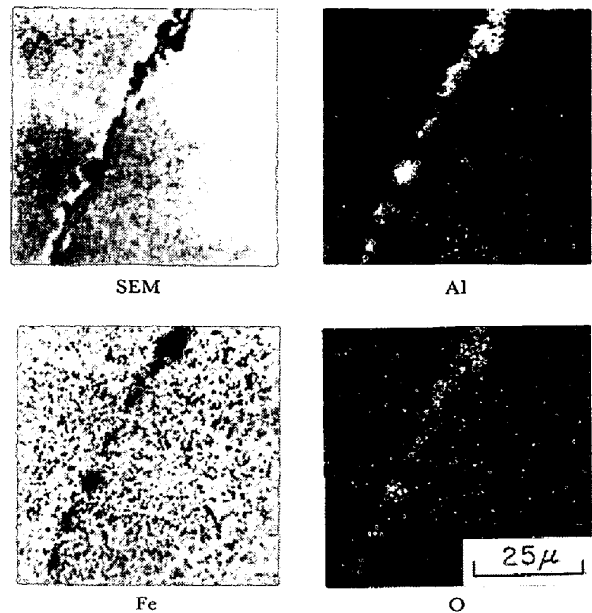


Photo. 2. Electron scanning images of inclusions.

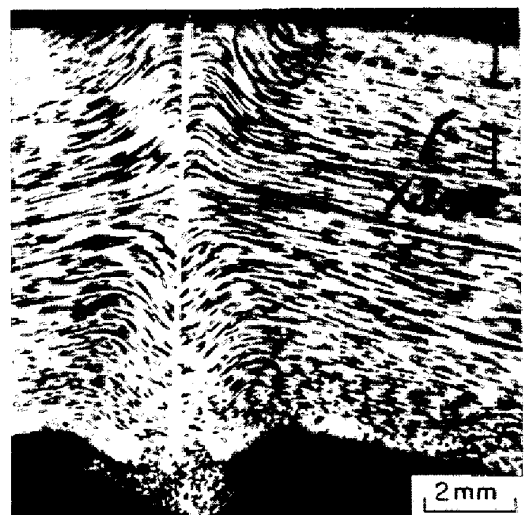


Photo. 3. Typical macrostructure of welds.

ところで、電縫鋼管の溶接部近傍では接合時にメタルの動きを必ずともなう。Photo. 3には溶接部近傍のメタルフローを、「ピクリン酸アルコール+表面活性剤」腐蝕液により現出させて示した。溶接時の挙動も加味してこのメタルフローの動きを模式的に Fig. 1 に示す。高

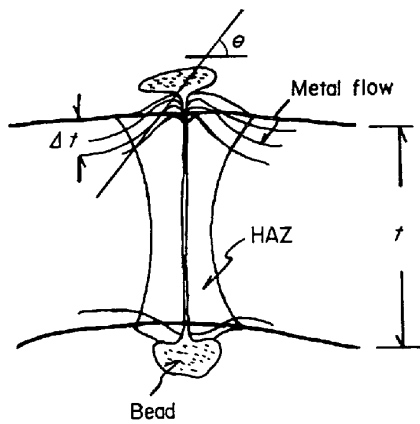


Fig. 1. Schematic of upset butt weldments.

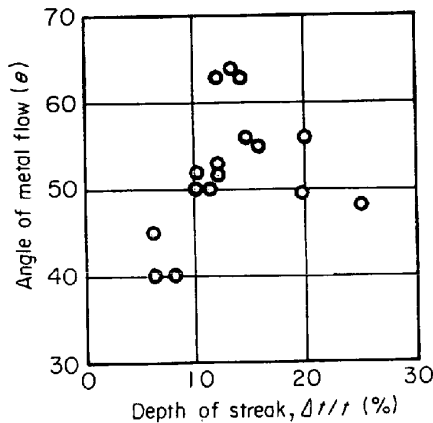


Fig. 2. Relationship between depth of streak ( $\Delta t/t$ ) and angle of metal flow ( $\theta$ ).

周波誘導溶接において、溶融部分が接合の際に鋼管の内外面に押し出されると同時に、その近傍も移動して図のごときメタルフローが形成される。ここで注目すべき点は、溶接部近傍の鋼管の内面および外面の表層部ではメタルフローが急激な立ち上がりを示すことである。

電縫鋼管では、造管の際に鋼管外面側は伸び、内面側は圧縮を受けるが、造管後も管周方向に引張応力が作用している。メタルフローの立ち上がりの程度が大きいほど、素材をZ方向へ引張ると同様の結果となり、非常に小さな非金属介在物の存在によつても、欠陥の発生を招くことになる。さらに、ビードの切削によつてこの非金属介在物が表面に露出するためにより以上に欠陥を発生しやすい。

Photo. 3に示した欠陥部のメタルフローからも、立ち上がりの大きなところで欠陥を発生していることが明らかである。

ビード切削部におけるメタルフローの立ち上がり角度は、Fig. 2に示すごとく素材板厚のおよそ15%前後に相当する部分で最も大きな値を示す。したがつて、この部分に非金属介在物が多いと欠陥を発生しやすい。次章で示すごとく、連鑄材の非金属介在物は鑄片厚さの10~40 mmの部分、すなわち、200 mm厚鑄片では、板厚の5~20%の部分に集積しやすい傾向にある。そのため、連鑄材を素材とした厚肉小径の電縫鋼管では、磁粉探傷欠陥が発生しやすいと考えることができる。

### 3.2 連鑄々片の非金属介在物の分布

Photo. 4に鑄片横断面のサルファープリントの代表例を示す。三つの領域にSの濃化が認められ、非金属介在物も集積していることが判明した。

- (i) 鑄片表層10~40 mmの部分 (X-Zone と呼ぶ)
- (ii) 鑄片隅角部分 (Y-Zone と呼ぶ)
- (iii) 鑄片厚み中心部分 (Z-Zone と呼ぶ)

これらの各部分のうち、(ii)および(iii)の領域での非金属介在物の集積現象は、鋼塊においても一般に認められている<sup>9)</sup>。すなわち、Y-Zone は鑄片の短辺面および

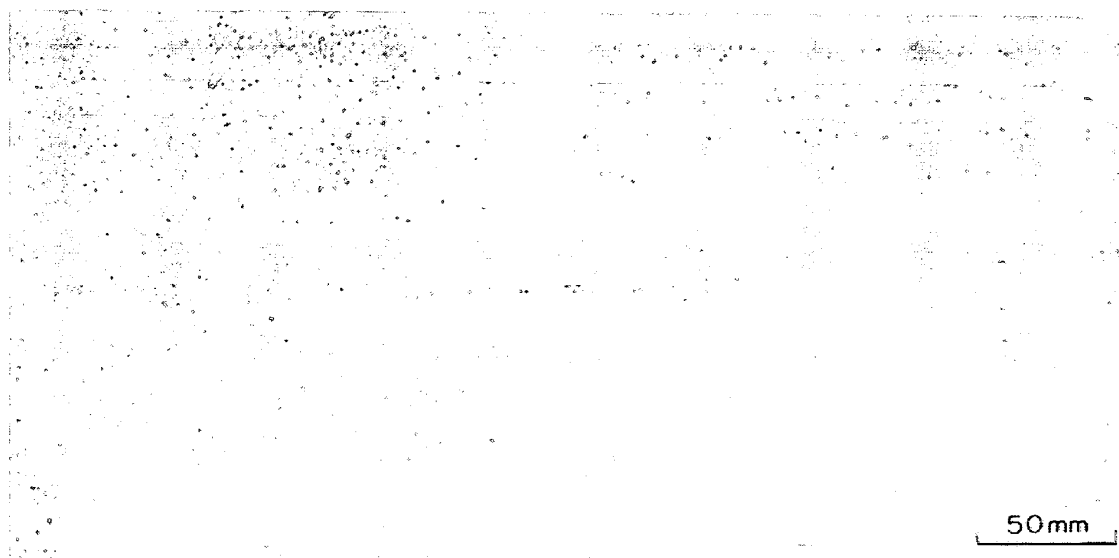


Photo. 4. Typical sulfur-print of the cross section of slabs.

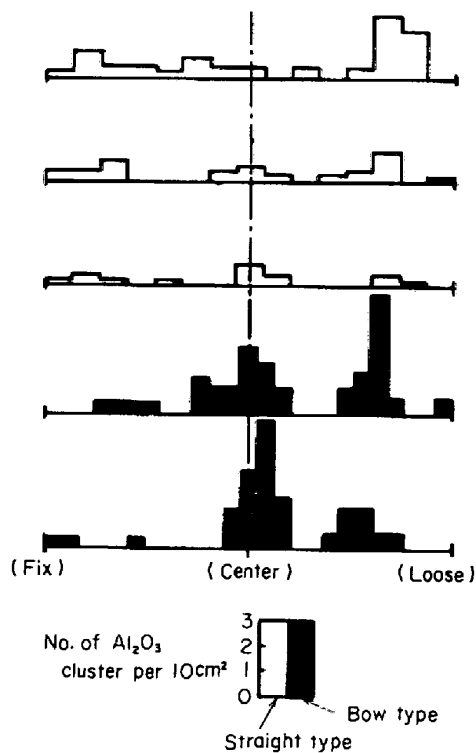


Fig. 3. Distribution of macroinclusions on the cross section of slabs in the direction of thickness.

長辺面から発達してきた柱状晶が合致するところであり鋼塊においては短面および底面からの柱状晶が合致する部分に相当する。Z-Zone は鑄片の最終凝固位置であり鋼塊においても最終凝固位置に非金属介在物が集積することはよく知られている。

一方、X-Zone での非金属介在物の集積については、従来鋼塊でこれと対応する現象が報告されておらず、以下、X-Zone での非金属介在物集積状況についての調査結果を示す。

地疵の分布状況を Fig. 3 に示す。円弧型連鑄機による鑄片の供試材は本研究の供試材同様の成分系の電鍍管用 Al-Si キルド鋼である。地疵の測定は鑄片横断面を #320 エメリペーパー研磨後、目視観察した。垂直型連鑄機で製造した鑄片では、鑄片表層部 10~40 mm の X-Zone と鑄片厚み中心部に地疵が多く分布している。垂直型連鑄機においては、凝固の条件は表裏対称であり、非金属介在物の分布もほぼ鑄片の表裏で対称である。これに対して、円弧型連鑄機で製造した鑄片の地疵分布は一般に報告されているごとく、円弧の内面（上面側）に浮上過程の非金属介在物が捕捉されやすいために、上面側での非金属介在物の偏在が目立っている。

しかしながら、円弧型連鑄機の場合においても、上面側に比較すると程度は軽いが、下面側の鑄片表層部 10~

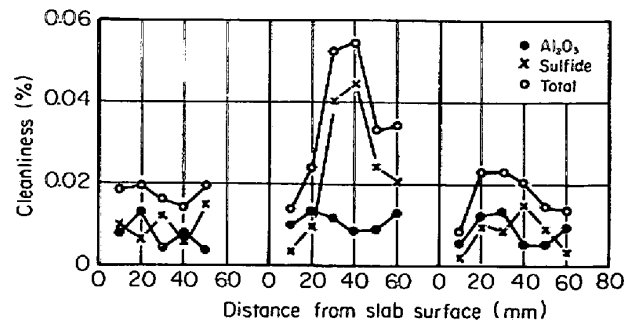


Fig. 4. Distribution of inclusions on the cross section of slabs in the direction of thickness.

40 mm の X-Zone に相当する部分に非金属介在物の集積傾向が認められることは、注目に値する。

Fig. 4 に鑄片厚さ方向の清浄度の分布について典型的な 3 例を示す。鑄片表層部から 10 mm 間隔に、非金属介在物の形態別に清浄度を測定した結果の代表例である。鑄造条件、S-含有量などによって非金属介在物集積の程度は異なるが、いずれの場合にも X-Zone で明らかな偏在を示している。

この X-Zone に集積する非金属介在物は、Al 強脱酸のために単体あるいは群落状の  $Al_2O_3$  であり、必ずしも巨大なものではない。X-Zone にみられる群落状  $Al_2O_3$  の代表例を Photo. 5 に示す。Fig. 4 に示した例について、この群落状  $Al_2O_3$  に注目して、鑄片厚さ方向の群落状  $Al_2O_3$  の分布を調査した結果 (A B C の 3 例) を Fig. 5 に示す。調査方法は鑄片横断面で鑄片の幅中央部 50 mm の試片中に存在する全ての群落状  $Al_2O_3$  について、

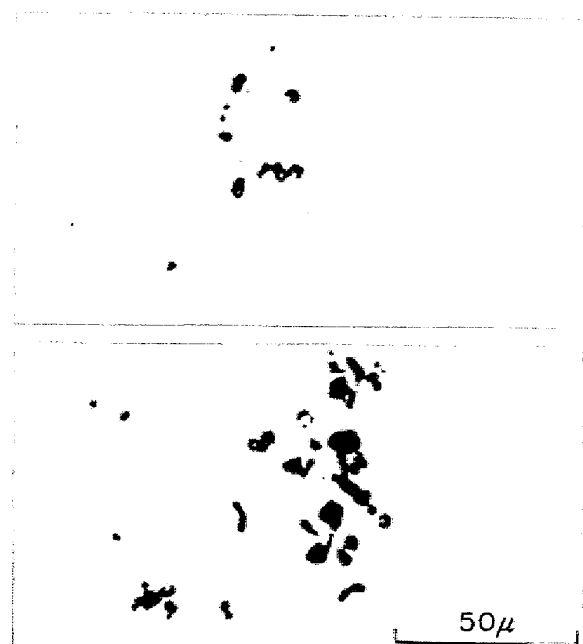


Photo. 5. Typical  $Al_2O_3$  clusters.

铸片表面からの距離を測定した。群落状  $Al_2O_3$  の分布も地疵分布および清浄度などと同様 X-Zone および铸片厚み中心部で集積現象を示す。

以上、垂直型連铸機で製造した铸片では、铸片表層部 10~40 mm の範囲に非金属介在物集積部が存在することを明らかにした。

### 3.3 連铸々片の凝固組織

前述の非金属介在物集積部、X-Zone 近傍の凝固組織について検討した。

Photo. 6 に铸片横断面 X-Zone 近傍のマクロ組織の代表例を示す。X-Zone の近傍においても柱状晶は連続的に成長している。

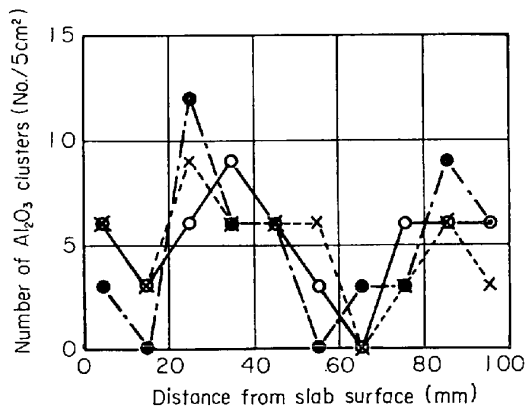


Fig. 5. Distribution of  $Al_2O_3$  clusters on the cross section of slabs in the direction of thickness (slab thickness; 200mm).



Photo. 6. Typical macrostructure on the cross section of slab.

に成長している。

一方、凝固速度、温度勾配などの冷却条件に依存することが報告されている<sup>10)11)</sup>、デンドライト組織、とくに 2 次デンドライトアーム間隔が、X-Zone の領域で変化を示すことを見出した。すなわち、铸片横断面の幅中央部分で厚み方向に連続した顕微鏡試料を作成し、オーバーホッファー氏液を用いてデンドライト組織を現出した。一例を Photo. 7 に示す。3 個の 2 次デンドライトアーム間隔を測定し、これを平均した。測定は、铸片の各位置に対して 3 回くりかえし実施し、铸片の厚さ方向の距離に対する 2 次デンドライトアーム間隔を求めた。

Fig. 6 に 16 チャージの铸片についての測定結果を示す。代表例として、3 チャージ (E.V.I) については実

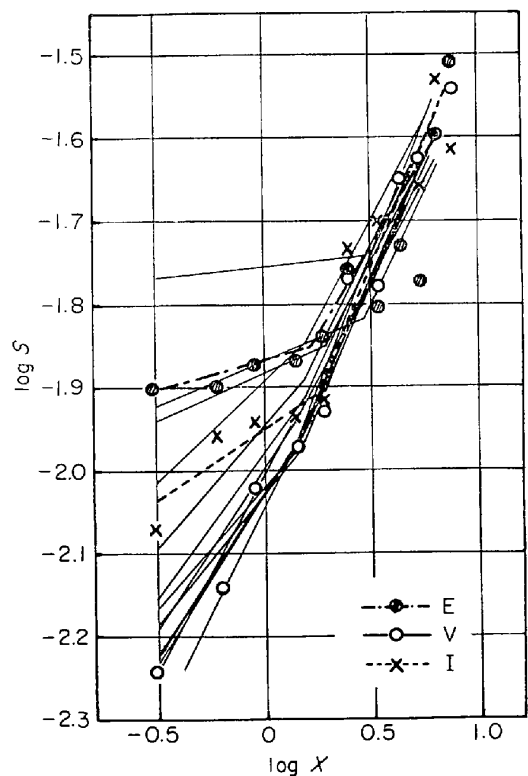


Fig. 6. Relation between secondary dendrite arm spacings ( $S$ , cm) and distance from the slab surface ( $X$ , cm).

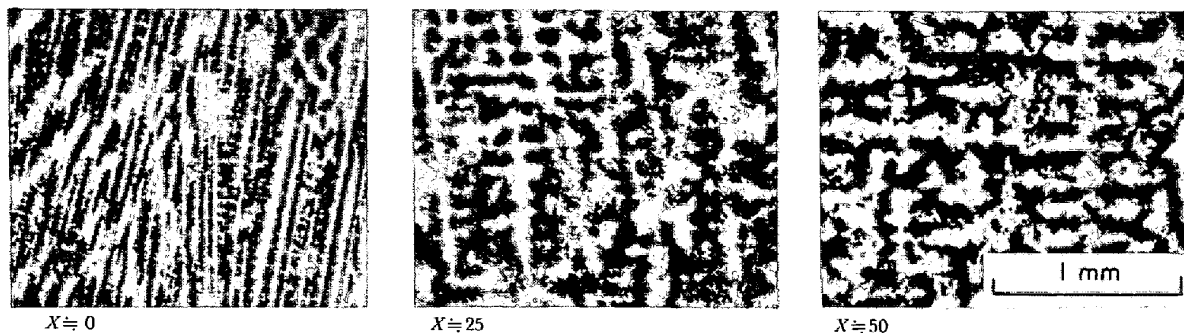


Photo. 7. Microstructures of slabs (etched by Oberhoffer reagent).

測値を示したが、鑄片厚み方向の距離と2次デンドライト間隔の各々について対数をとると、両者の関係は X-Zone 近傍を境にして明らかに二つの直線で示することができる。そこで、両者の関係について、まず鑄片表層側から順次測定点を増しながら最小自乗法を実施し、直線関係を求めた。ついで、鑄片厚み中心側からも同様の検討を行ない各チャージについて二つの直線を求めて Fig. 6 に示した。大部分のデータは、X-Zone を境としてデンドライトの成長が異なることを示している。また、チャージによりその屈折の程度が異なる。X-Zone を境とした二つの直線のうち、鑄片内部側ではいずれのチャージについてもほぼ同一の傾向を示す。これに対して、鑄片表層側では、チャージによつて非常に異なっている。

すなわち、鑄片厚み方向の距離に対する2次デンドライトアーム間隔の関係において、X-Zone を境にした変化は、チャージによつて鑄片表層側でのデンドライトの成長が異なることを示している。

#### 4. 考 察

##### 4-1 非金属介在物の捕捉について

以上に示した連鑄々片の非金属介在物の分布と凝固組織、とりわけデンドライトの成長の不連続性との関係について若干検討する。

従来円弧型連鑄機においては、円弧の内面に大型の非金属介在物が集積することがよく知られている。これは、円弧の内面で非金属介在物の浮上が阻止されるためと考えられており、非金属介在物の集積程度は、連鑄機の曲げ半径、溶鋼の流動、すなわちクレーター内溶鋼の侵入深さなどによつて左右されることが報告されている<sup>2)~6)12)</sup>。

垂直型の連鑄機においても、注入流の動きによる非金属介在物のクレーターへの侵入、溶鋼温度による非金属介在物浮上への影響、あるいは注入流による凝固前面の洗滌作用の影響などを無視することはできないが、これらの要因だけでは、X-Zone のごとき特定位置への非金属介在物の集積を完全に説明することは困難である。すなわち、これらの要因は溶鋼中での非金属介在物の挙動を支配するものであり、円弧型連鑄機の円弧の内面が非金属介在物の浮上を阻止することに相当する非金属介在物の捕捉機構が、垂直型連鑄機構の場合にも作用していると考えられる。

凝固過程で晶出する非金属介在物、とくに MnS の形態や分布については、凝固速度の影響が示されている<sup>13)14)</sup>。一方、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> のごとき、溶鋼中にすでに存在し浮遊している非金属介在物についても、凝固の進行にともない

Table 3. Casting conditions.

No.		E	I	V
Ladle analysis	C (%)	0.24	0.22	0.21
	Si (%)	0.34	0.33	0.32
	Mn (%)	0.52	0.52	0.60
	P (%)	0.028	0.019	0.020
	S (%)	0.011	0.012	0.006
	Sol. Al (%)	0.023	0.057	0.021
Temperature in tundish	(°C)	1 545	1 550	1 565
T.L.L.*	(°C)	1 513	1 515	1 516
Super-heat in tundish	(°C)	32	35	49
Slab thickness	(mm)	200	200	200

\* T.L.L. = 1 538-55·[C%]-80·[C%]<sup>2</sup>-13·[Si%]-4.8·[Mn%]<sup>15)</sup>

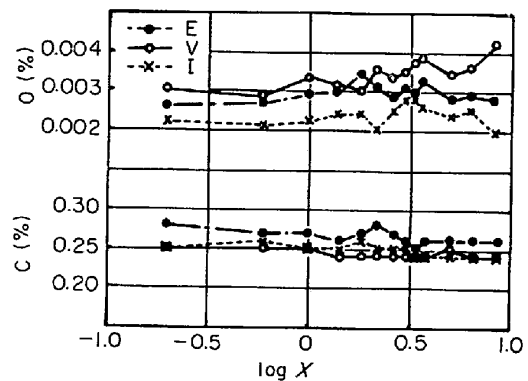


Fig. 7. Distribution of O, C on the cross section of the slabs in the direction of thickness (X; cm).

部は柱状晶あるいはその間隙に捕捉されるものの、かなりの介在物が内部溶鋼へ排出され、何らかの障壁たとえば柱状晶相互の合致、もしくは沈殿晶などによつて集積することが報告されている<sup>19)20)</sup>。また、二次析出がほとんど無視できる Al-キルド鋼鑄片での厚み中心部への非金属介在物の集積において、厚み中心部が最終凝固位置であることの意味は上述の議論と同様であると考えられる。したがつて、X-Zone への非金属介在物の集積については、一定の割合で凝固前面への排出と捕捉がおこなわれている Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介在物が、結晶成長の不連続によつて、その捕捉割合を増加した結果と考えことができる。

Fig. 6 に示した種々の結晶成長の不連続性を示すものの中から、それぞれ不連続程度の異なる試片を選び、各種成分の分布を検討した。調査の対象とした鑄片の鑄造条件を Table 3 に示す。Fig. 7 に O と C の分布を代表例として示した。結晶成長がほとんど不連続性を示さない No. V では O は連続的に増加を示すのに対して、不連続程度の大きい No. E では不連続部に対応する位置で増加を示し、非金属介在物が集積することに対応している。

これらの傾向は、X-Zone への非金属介在物の集積程

度が、結晶成長の不連続程度と関係を持つことを示しているものと考えられる。

4.2 結晶成長の不連続性におよぼす铸造温度の影響

結晶成長の不連続性を示すものとしてとりあげた、2次 dendroライトアーム間隔は、平均冷却速度に依存することが報告されており、次式で示される<sup>10)</sup>。

$$S = a \cdot R^{-b} \dots\dots\dots (1)$$

S : 2次 dendroライトアーム間隔

R : 平均冷却速度

a, b : 鋼種により定まる定数

また、平均冷却速度は次式で定義される。

$$R = \Delta F / (t_s - t_l) \dots\dots\dots (2)$$

$\Delta F$  : 凝固温度範囲

$t_s, t_l$  : 固相線、液相線温度に到達するまでの時間

一方、Fig. 6 に示したごとく、鑄片の凝固距離と2次 dendroライトアーム間隔の関係を示す X-Zone で屈折する二つの直線は、鑄片の表層側でチャージによつて異なっており、X-Zone を過ぎるとほぼ一定の関係を示すようになる。すなわち、凝固の初期において、2次 dendroライトアーム間隔が相対的に小さな値となるような条件で、Fig. 6 の関係は連続した一つの直線で示すことが出来、連続的結晶成長が達成される。初期の凝固条件を支配する因子の一つとして溶鋼の過熱度が注目される。(1), (2) 式の関係において、溶鋼の過熱度が大きいと固液共存層が小さくなり<sup>16)</sup> dendroライトアーム間隔は小さくなる。したがつて、Fig. 6 に示した結晶成長の不連続の程度は、溶鋼過熱度で整理出来ると考えられる。

Fig. 8 に、X-Zone より鑄片内部側の2次 dendroライ

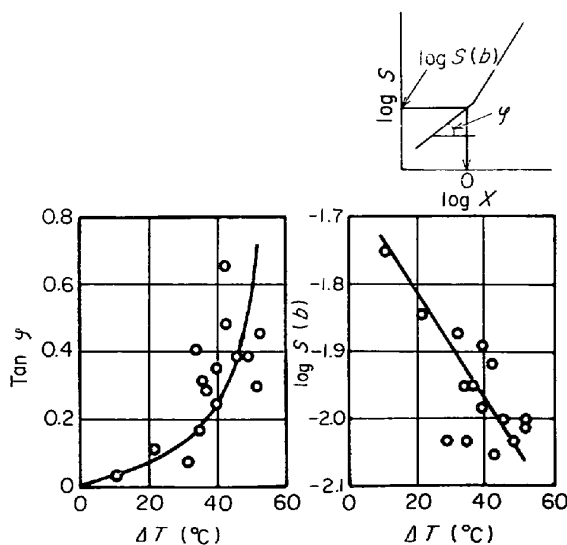


Fig. 8. Influence of superheat on  $\eta$  and  $S(b)$ .

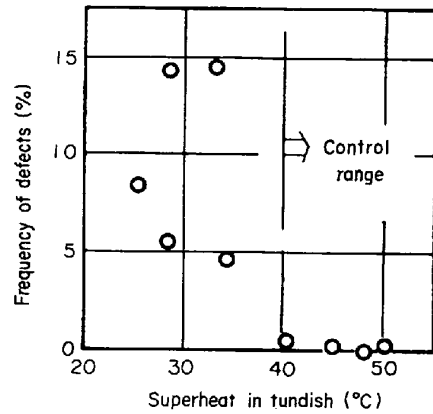


Fig. 9. Relationship between frequency of magnafux defects and superheat in tundish.

トアーム間隔を示す直線に対する凝固初期における直線の勾配と切片を、右上の図に模式的に示すごとく求め、溶鋼過熱度との関係について整理して示した。両者のあいだには相関が認められ、上記の考え方と一致する。

以上の検討から、溶鋼過熱度を大きくして結晶成長を連続的にすることが、連铸々片での非金属介在物集積防止対策として導かれる。さらに溶鋼過熱度を大きくすることは、非金属介在物の浮上、分離を促進すると考えられており<sup>17)18)</sup>、集積防止に加えて、溶鋼中の非金属介在物水準を改善する点からも有利である。

Fig. 9 に溶鋼過熱度と磁粉探傷欠陥発生率の関係を示した。溶鋼過熱度が大きくなると欠陥の発生は減少する。溶鋼過熱度を 40°C 以上に管理することにより、非金属介在物の集積に起因する欠陥の発生は完全に防止できることが確認された。

5. 結 論

垂直型連铸機により製造した Al-Si キルド鋼の、厚肉小径電縫鋼管素材適用で問題となる溶接部欠陥の原因と対策を明らかにした。さらに欠陥の原因となつている非金属介在物が、連铸々片の非金属介在物の特徴的な分布に起因していることを示し、連铸の凝固特性にもとづくものであることを明らかにした。その結果、この種欠陥は铸造温度の管理により完全に防止できることを確認した。

(1) 連铸々片を素材とした厚肉小径電縫鋼管に発生する磁粉探傷欠陥は、連铸々片の表層部 10~40 mm 部分に存在する非金属介在物が、造管時のメタルフローの立ち上がりとともにビード切削部に露出することに起因する。

(2) 垂直型連铸機により製造した Al-Si キルド鋼鑄片では、鑄片表層部 10~40 mm の部分に非金属介在物

の集積現象がある。

(3) この非金属介在物の集積は、結晶成長の不連続によつて、非金属介在物が捕捉されるために生ずる。

(4) さらに、この結晶成長の不連続は、鑄造温度によつて改善できる。すなわち、溶鋼過熱度を大きくすることによつて、凝固初期の結晶成長をスプレー冷却期の結晶成長状況に近づけ、連続的結晶成長をはかることができる。

(5) したがつて、厚肉小径電鍍鋼管に発生する磁粉探傷欠陥は、鑄造温度を高温に管理することにより完全に防止できる。

#### 文 献

- 1) 森 久: 鉄と鋼, 60(1974) 7, p. 784
- 2) F. W. IRWIN and R. J. MILBOURNE: J. Metals, Sept. (1970), p. 30
- 3) 熊井 浩, 広本 健, 松永 久, 大橋徹郎, 大野唯義: 鉄と鋼, 60(1974) 7, p. 926
- 4) H. V. ENDE and G. VOGT: JISI, 20(1972), p. 889
- 5) 垣生泰弘, 吉井 裕, 北岡英就, 飯田義治, 今井卓雄, 上田典弘: 鉄と鋼, 60(1974) 7, p. 962
- 6) 鈴木健一郎, 江島彬夫, 仲村秀就, 森 耐介, 三代祐嗣, 飯田義治: 鉄と鋼, 61(1975) 13, p. 2805
- 7) 松永吉之助, 波木周和, 荒木泰治: 鉄と鋼, 59(1973) 1, p. 72
- 8) 長谷部茂雄, 大塚健純, 高橋 進, 古賀敏昭: 住友金属, 21(1969) 4, p. 413
- 9) 浅野鋼一, 松永 久: 鉄と鋼, 56(1970) 14, p. 1916
- 10) 鈴木 章, 鈴木 武, 長岡 豊, 岩田至弘: 日本金属学会誌, 32(1968), p. 1301
- 11) T. Z. KATTUMIS, J. C. COUGHLIN and M. C. FLEMINGS: Trans. AIME, 239(1967), p. 1506
- 12) 植田嗣治, 丸川雄浄, 豊田 守: 鉄と鋼, 60(1974) 7, p. 943
- 13) 梅田高照: 凝固部会シンポジウム資料, (1976), p. 31
- 14) K. SCHWERDTFEGER: Arch. Eisenhüttenw., 41(1970) 9, p. 923
- 15) 平尾正純, 金丸和雄, 森 久: 鉄と鋼, 55(1969), p. S 85
- 16) 大井 浩, 松野淳一: 鉄と鋼, 60(1974) 7, p. 807
- 17) 満尾利晴, 小池与作, 堀籠健男: 鉄と鋼, 57(1971), p. 505
- 18) 岡崎義隆, 香月淳一, 越川隆雄: 鉄と鋼, 55(1969), p. S 525
- 19) 中川義隆, 百瀬昭次, 鉄と鋼: 53(1967), p. 345
- 20) 浅野鋼一: 第8回非金属介在物部会資料 (1968)