

## 低温模型実験における凝固過程に及ぼす自然対流の効果\*

宮 沢 憲 一\*\*・ 鞭

巖\*\*\*

## Effects of Natural Convection on Solidification Processes in Experiments Conducted by the Use of Cold Systems

Kenichi MIYAZAWA and Iwao MUCHI

## Synopsis:

A study of the effects of natural convection on solidification processes under the various casting conditions has been made by the use of KCl solutions as the solidification system.

Experimental results show that the increase in the teeming temperature causes the increase in the velocity of natural convection taking place along the solidification front and the increase of this velocity results in the acceleration of the removal rate of superheats in the liquid pool and also increase of the deviations of the liquidus and solidus planes from a vertical plane. Furthermore, it has been found that within the range below an eutectic concentration, as the concentration of KCl solution increases, the mean maximum velocity in the natural convection becomes faster and also the deviations of the liquidus and solidus planes from a vertical plane increase, but the mean maximum velocity is not so much affected by the change of temperature in the colling box.

Moreover, it has been observed in the solidification experiments of the distilled water that the bubbles rising along the solidification front accumulate on the solidification front near the point of boundary-layer separation which moves upward with the progress of solidification process.

## 1. 緒 言

温度差を推進力とする自然対流が凝固過程において果たす役割については、従来、主として定性的な検討<sup>1)~6)</sup>が行なわれている。すなわち、非鉄金属の凝固組織やマクロ偏析に及ぼす自然対流の影響についての実験<sup>1)2)</sup>や定性的な解説<sup>3)</sup>および、液相内温度分布や凝固前面の形状の測定結果<sup>4)5)</sup>が報告されている。COLE<sup>4)</sup>、および、SZEKELYら<sup>5)</sup>は、垂直な冷却面と加熱面に囲まれた空間内に溶融非鉄金属を注湯し、凝固が進行しない定常状態下、および、他の定常状態に移行する際の遷移状態下において、液相内の温度分布や凝固前面の形状などを実測している。そして、加熱面から冷却面への熱流束が大きい場合ほど自然対流が顕著に生じ、そのために液相本体内には垂直方向にも温度勾配が存在することや凝固前面が垂直面に対して傾いてくることなどを報告している。

一方、キルド鋼塊の凝固過程の比較的初期の段階においても、熱対流が凝固前面に沿って存在することが RI

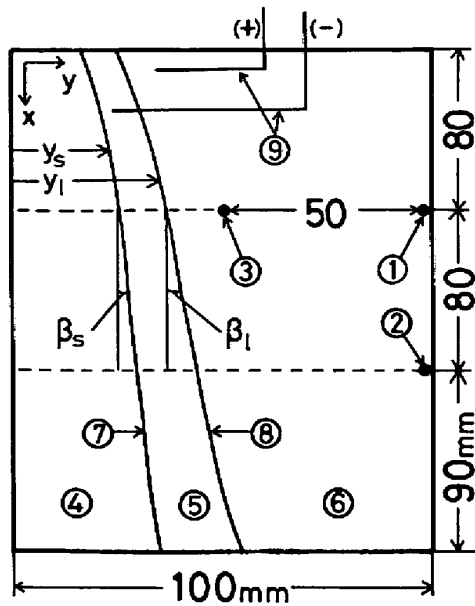
などを用いたトレーサー実験<sup>6)~8)</sup>から明らかにされている。従来、実操業におけるキルド鋼塊の凝固過程では、鋼塊底部における非金属介在物の低減対策として、粘稠層の成長速度に及ぼす溶鋼の注入温度の影響を定量的に把握することが重要とされている。この分野の研究としては、低温および高温で上注ぎ注入した 6 t 扁平キルド鋼塊の凝固過程における熱対流速度をトレーサー法によって実測した満尾らの研究<sup>9)</sup>があるが、造塊条件を変更した場合の自然対流の実測に関する報告は非常に少ないのが現状である。

そこで、本研究では、注入温度や冷却条件などの操作条件を変更した場合に、凝固過程における自然対流の役割を定量的に求めて、実操業での鋼塊の品質向上の基礎資料を得る目的で模型実験を行なった。すなわち、著者らは前報<sup>9)</sup>において、チモールブルー法に基づいて凝固過程における自然対流の流速を実測する手法について報告したが、本研究では、注入温度や冷却条件などの操作条件を種々変化させて KCl 溶液の凝固実験を行ない、

\* 昭和 50 年 9 月 30 日受付 (Received Sept. 30, 1975)

\*\* 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

\*\*\* 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)



- ①~③ Thermocouples, ④ Solid shell,  
 ⑤ Mushy zone, ⑥ Liquid pool,  
 ⑦ Solidus plane, ⑧ Liquidus plane,  
 ⑨ Electrodes for generating pulse

Fig. 1. Schematic representation of the experimental arrangement.

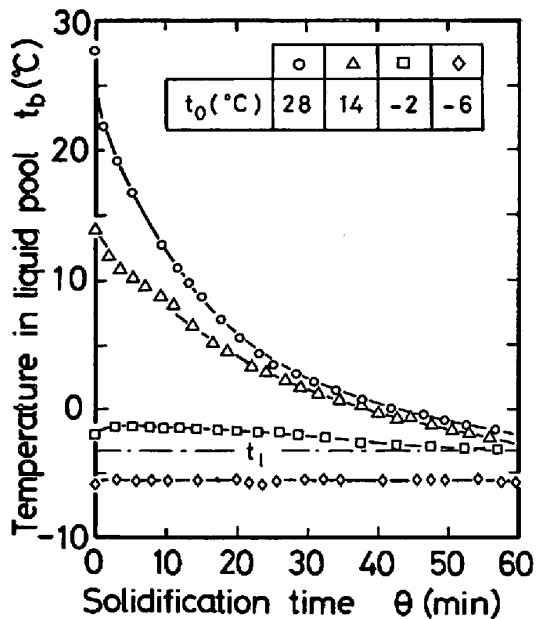


Fig. 2. Changes in the temperature observed at the location ③ given in Fig. 1 under the various teeming temperatures. ( $c=1 \text{ mol/l}$ ,  $t_w = -54^\circ\text{C}$ )

前報<sup>9)</sup>と同様の測定手法を用いて凝固前面に沿って起こる自然対流の最大流速, および, 凝固厚みや液相内の温度の経時変化を実測し, その実測結果に基づいて自然対流の役割について検討する. なお, 液相の過熱の除去速度や凝固速度に及ぼす自然対流と強制攪拌の効果の差異

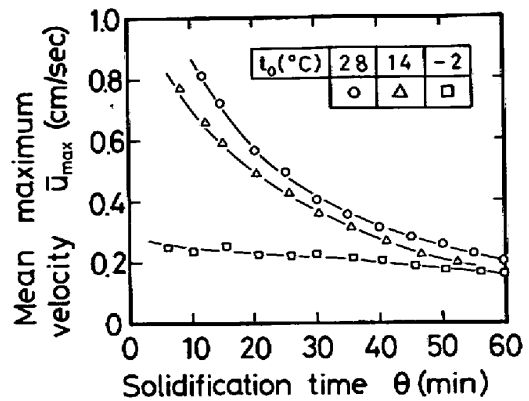


Fig. 3. Effects of the teeming temperature on the mean maximum velocity in the natural convection measured over the range of  $x$  from 5 to 10 cm. ( $c=1 \text{ mol/l}$ ,  $t_w = -54^\circ\text{C}$ )

について検討し, さらに, 蒸留水の凝固過程において見られる境界層の剝離現象や凝固後の固相内に残存する気泡集積面の形状などについて報告する.

## 2. 実験方法

本実験で採用した鑄込み部の模式図を Fig. 1 に示す. 凝固実験の手順は前報<sup>9)</sup>と全く同様であり, エチルアルコールとドライアイスを用いて冷却槽内を所定の温度まで冷却した後, 所定の濃度の KCl 溶液を鑄込み部へ注入し, 厚さ 1 mm のアルミ製の鑄壁を通して除熱することにより一方向へ凝固を行なわせる.

液相内の温度の実測は, Fig. 1 に示した ①~③ の各位置に設置した銅-コンスタン熱電対 ( $0.1 \text{ mm}\phi$ ) を用いて行なつた. また, 凝固厚みの実測は, 湯面から下方へ 8 cm および 16 cm の位置の 2 カ所で行なつた. さらに, 凝固前面に沿つた自然対流の最大流速の測定は, 前報<sup>9)</sup>で報告したチモールブルー法で採用して湯面から下方へ 3 cm の位置でタイムラインを発生させ, 鑄込み部の壁面に 1 cm ごとに刻んだ水平線の区間をタイムラインの先端が通過する時間を実測することによつて行なつた.

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 注入温度の効果

注入温度  $t_0$  だけが異なる条件下で, Fig. 1 の ③ の位置における温度  $t_b$  の経時変化の実測結果を Fig. 2 に示す. これらの実験で使用した KCl 溶液の濃度  $c$  は  $1 \text{ mol/l}$  であり, 冷却槽温度  $t_w$  は  $-54^\circ\text{C}$  ( $\pm 1.5^\circ\text{C}$ ) でほぼ一定に保つた. Fig. 2 から, 同じ凝固時間  $\theta$  で比較すると,  $t_b$  は  $t_0$  が低い場合ほど低いが, 温度降下速度 ( $-dt_b$

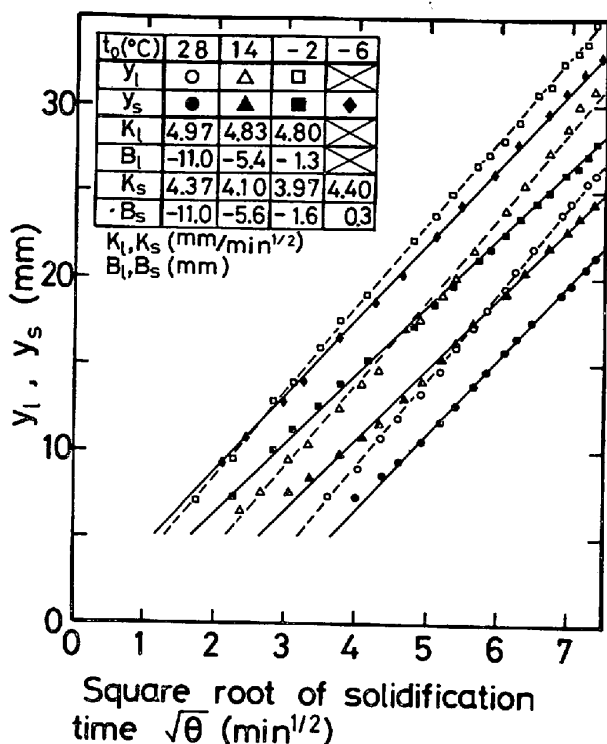


Fig. 4. Changes in the distances from the chill surface to the liquidus plane and to the solidus plane observed at the level of  $x=8$  cm under the various teeming temperatures. ( $c=1$  mol/l,  $t_w=-54^\circ\text{C}$ )

$/d\theta$ ) は  $t_0$  が高い場合ほど大きいことがわかる。また、液相線温度 ( $t_l=-3.3^\circ\text{C}$ ) 以上で注入した場合、 $t_b$  は  $\theta$  の経過に伴って  $t_l$  へ漸近するが、 $t_0=-6^\circ\text{C}$  の場合には、 $t_b$  は Fig. 2 における  $\theta$  の範囲内ではほとんど変化しない。なお、 $t_0=-6^\circ\text{C}$  の場合には、KCl-H<sub>2</sub>O 系の平衡状態図<sup>10)</sup> に従えば、注入時の固相率は 0.46 であり、注入以前から既にデンドライト片が溶液中に充満している。

湯面より下方へ 5 cm の位置からの 10 cm 位置の間で、凝固前面に沿って下降する自然対流の最大流速の平均値  $\bar{u}_{\max}$  の実測結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 から、同じ  $\theta$  における  $\bar{u}_{\max}$  は  $t_0$  が高い場合ほど大きくなるが、 $\theta$  がかなり経過すると  $t_0$  が異なつていても  $\bar{u}_{\max}$  の値はほぼ同じになることがわかる。なお、 $t_0=-6^\circ\text{C}$  の場合には、注入直後から鑄込み部の下底部を除いた大半の領域が固液共存相であり、この共存相内で発生させたタイムラインは下方へ非常にゆつくりと移動し、その速度は  $t_0$  が  $t_l$  以上の場合に観測された最大流速に比べて無視できる程度であつた。したがつて、Fig. 2 で  $t_0=-6^\circ\text{C}$  の場合の温度変化がほとんど認められない理由として、上述の固液共存相内の自然対流が非常にわずかし

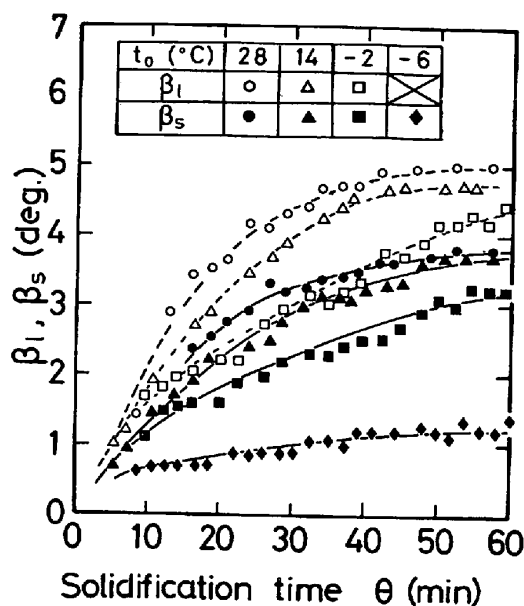


Fig. 5. Changes in the angle of inclination of liquidus plane and one of solidus plane measured over the range of  $x$  from 8 to 16 cm under the various teeming temperatures. ( $c=1$  mol/l,  $t_w=-54^\circ\text{C}$ )

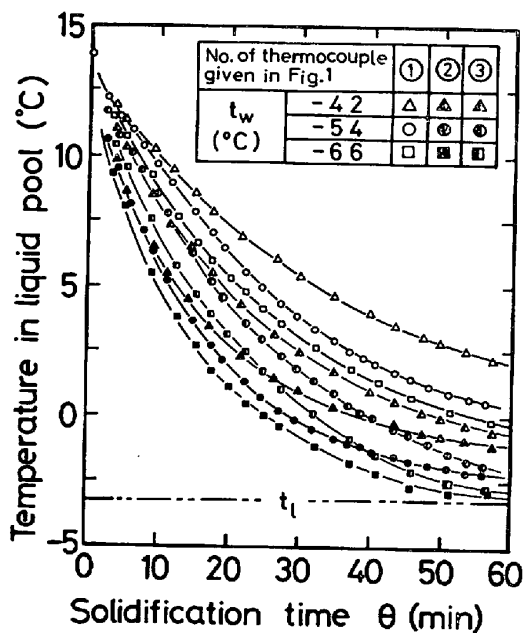


Fig. 6. Changes in the temperature in liquid pool observed under the various temperatures in cooling box. ( $c=1$  mol/l,  $t_0=14^\circ\text{C}$ )

生じていないことによるものと考えられる。

鑄壁から液相線までの距離  $y_l$  および鑄壁から固相線までの距離  $y_s$  の経時変化について、湯面から下方へ 8 cm の位置で実測した結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 から同じ  $\theta$  における  $y_l$  および  $y_s$  は  $t_0$  が高い場合ほど小さいこと、および、 $y_l$  と  $y_s$  が凝固厚さに関するルート則

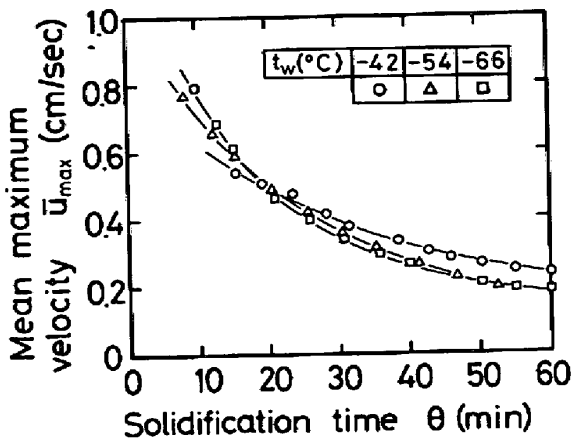


Fig. 7. Effects of the temperature in cooling box on the mean maximum velocity in the natural convection measured over the range of  $x$  from 5 to 10 cm. ( $c=1 \text{ mol/l}$ ,  $t_0=14^\circ\text{C}$ )

( $y_i = K_i \sqrt{\theta} + B_i$ ,  $i=l, s$ ) に従い始める時刻は,  $t_0$  が低い場合ほど早いことがわかる. なお, Fig. 4 には  $t_0$  を変更した場合の各直線の傾き ( $K_l, K_s$ ) および縦軸との切片 ( $B_l, B_s$ ) の値も示したが, 本実験で採用した  $t_0$  の変化範囲内では,  $K_l$  と  $K_s$  の値が大きく変化しないのに対して,  $B_l$  と  $B_s$  の値は  $t_0$  によつてかなり異なっている. すなわち, 凝固初期にはこれら各直線は原点を通る各曲線によつて連結されるはずであり, 自然対流によつて液相の過熱 ( $t_b - t_l$ ) がある程度除去されてから上述のルート則に従つて凝固が進行することが推察される.

鋳型内において凝固前面に沿つて下降する自然対流が存在すると, ほぼ水平方向へ成長している凝固界面は, たとえば, Fig. 1 に示したように垂直面から傾いてくるのが従来より報告<sup>3)4)</sup> されているが, 本実験においても, 凝固界面の傾きが認められた. 湯面から下方へ 8 cm および 16 cm の各位置で実測した  $y_l$  と  $y_s$  の値を使つて, Fig. 1 に示したような液相線面と固相線面の傾き角 ( $\beta_l, \beta_s$ ) を求めた結果を Fig. 5 に示す. Fig. 5 から,  $\beta_l$  と  $\beta_s$  はともに  $\theta$  の経過に伴つて増加するが, これらの増加速度は次第に減少することがわかる. また,  $t_0$  が高い場合ほど  $\beta_l$  と  $\beta_s$  の各値は大きくなるが, これは, 固相線上での  $y$  方向における除熱の熱流束について, 上部 ( $x=8 \text{ cm}$ ) の熱流束が下部 ( $x=16 \text{ cm}$ ) のそれよりも大きくなると  $\beta_s$  の値が増加するが, この上部と下部の熱流束の差異は  $t_0$  が高い場合ほど増大するためであり, 液相線上の熱流束についても同様のことがいえるためである.

3.2 冷却槽温度の効果

冷却条件の1つである冷却槽温度  $t_w$  を変化させた場合の液相内の温度の経時変化を Fig. 6 に示す. Fig. 6 か

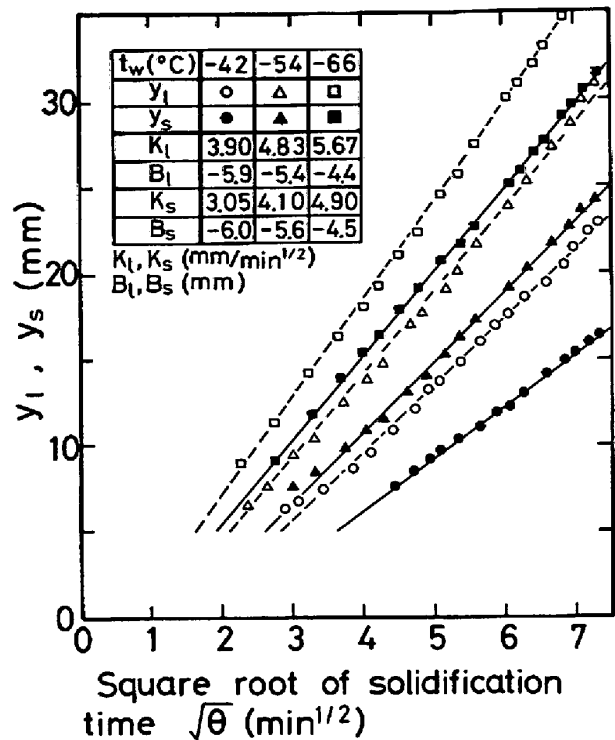


Fig. 8. Changes in the distances from the chill surface to the liquidus plane and to the solidus plane observed at  $x=8 \text{ cm}$  under the various temperatures in cooling box. ( $c=1 \text{ mol/l}$ ,  $t_0=14^\circ\text{C}$ )

ら, ①, ②, ③ のどの位置の温度も  $t_w$  が低い場合ほどより速やかに低下すること, および, ③ の位置より ② の位置の方がむしろ温度が低いことがわかる. なお, 同じ  $\theta$  における液相内の温度は ① が一番高く, ② が一番低くなるが, この傾向は  $t_0$  や  $t_w$  を変化させても変わらなかつた.

鋳型内上部における  $\bar{u}_{\text{max}}$  の経時変化を Fig. 7 に示す. Fig. 7 において, 凝固初期の  $\bar{u}_{\text{max}}$  は  $t_w$  が低い場合ほど大きくなるが,  $\theta$  が約 20 min 経過するとそれ以降での  $\bar{u}_{\text{max}}$  は  $t_w$  が低い場合ほど小さくなる傾向がある. しかしながら,  $\bar{u}_{\text{max}}$  に及ぼす  $t_w$  の効果は比較的小さいことがわかる.

湯面から下方へ 8 cm の位置における  $y_l$  と  $y_s$  の経時変化を Fig. 8 に示す. Fig. 8 から, 同じ  $\theta$  における  $y_l, y_s$ , および, 凝固速度 ( $dy_l/d\theta, dy_s/d\theta$ ) は, それぞれ,  $t_w$  が低い場合ほどより大きくなることがわかる. また, Fig. 8 に示した直線の傾き ( $K_l, K_s$ ) は  $t_w$  が低くなるにつれてかなり増加するが, 縦軸との切片 ( $B_l, B_s$ ) は  $t_0$  を変更した場合に比べてあまり大きく変化しない. したがつて,  $t_w$  の変更は主として  $K_l$  と  $K_s$  に影響を与えるといえる.

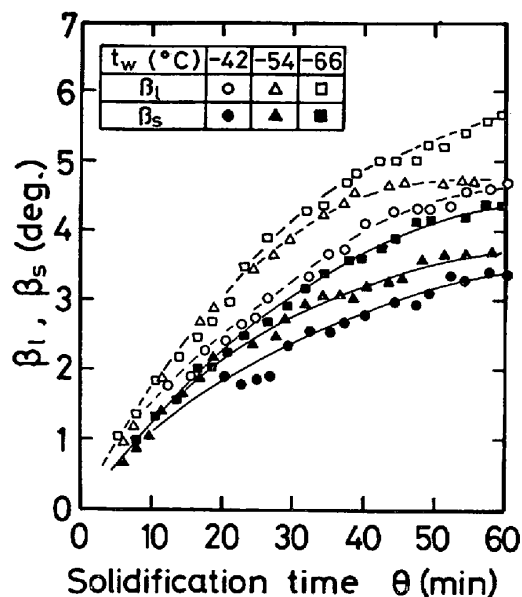


Fig. 9. Changes in the angle of inclination of liquidus plane and one of solidus plane measured over the range of  $x$  from 8 to 16 cm under the various temperatures in cooling box. ( $c=1 \text{ mol/l}$ ,  $t_0=14^\circ\text{C}$ )

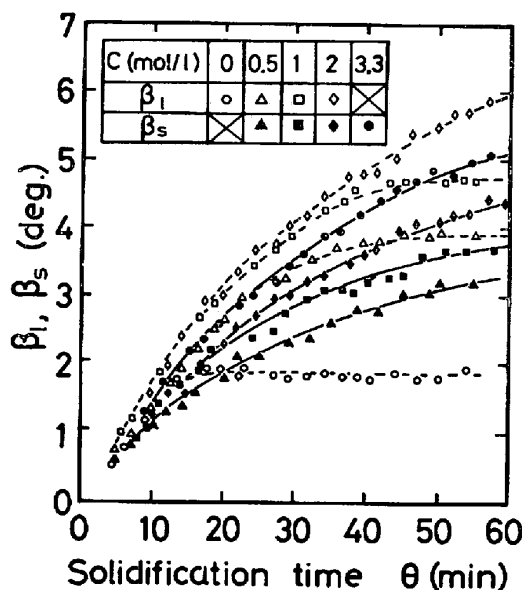


Fig. 11. Changes in the angle of inclination of liquidus plane and one of solidus plane measured over the range of  $x$  from 8 to 16 cm under the various concentrations of KCl solution. ( $t_0=14^\circ\text{C}$ ,  $t_w=-54^\circ\text{C}$ )

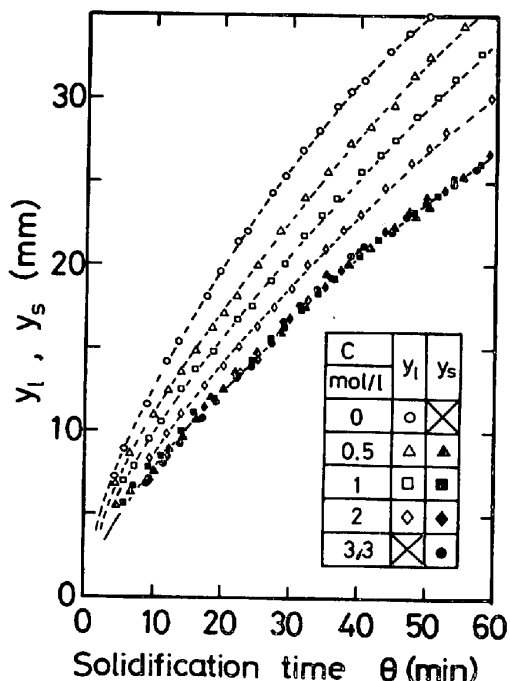


Fig. 10. Progresses of the liquidus plane and the solidus plane observed at  $x=8\text{cm}$ , ( $t_0=14^\circ\text{C}$ ,  $t_w=-54^\circ\text{C}$ )

湯面から下方へ 8cm および 16cm の各位置で測定した  $y_l$  と  $y_s$  の実測値を使って凝固界面の傾き角 ( $\beta_l$ ,  $\beta_s$ ) を求めた結果を Fig. 9 に示す。Fig. 9 から、 $\theta$  の経過に伴って  $\beta_l$  と  $\beta_s$  が増加する傾向は Fig. 5 の場合と同様で

あるが、同じ  $\theta$  における  $\beta_l$  と  $\beta_s$  は、それぞれ、 $t_w$  が低い場合ほど大きくなるのがわかる。

### 3.3 溶液濃度の効果

KCl-H<sub>2</sub>O 系の平衡状態図<sup>10)</sup>によると、KCl 溶液の濃度が共晶濃度 ( $c=3.3 \text{ mol/l}$ ) に近い場合ほど液相線温度は低くなる。前報<sup>9)</sup>では、0, 0.5, 1, 2, 3.3 mol/l の計 5 種類の KCl 溶液を用いて、自然対流が生じている際の境界層内の最大流速や液相内の温度の経時変化を実測した。そして、これらの実測結果から、 $t_0$  や  $t_w$  がそれぞれ同じ場合でも、同じ  $\theta$  における鋳型内上部の  $\bar{u}_{\text{max}}$  は共晶濃度に近い場合ほど大きく、液相内の温度は共晶濃度に近い場合ほど速やかに降下することがわかった。

前報<sup>9)</sup>と同一の実験条件下 ( $t_0=14^\circ\text{C}$ ,  $t_w=-54^\circ\text{C}$ ) で測定した  $y_l$  と  $y_s$  の経時変化を Fig. 10 に示す。なお、Fig. 10 における  $y_l$  と  $y_s$  は、湯面から下方 8cm の位置で実測したものである。また、 $c=0.5, 1, 2 \text{ mol/l}$  の場合の凝固過程には固液共存相が存在するが、蒸留水 ( $c=0$ ) と共晶濃度の場合には固液共存相は存在しない。Fig. 10 から、 $x=8\text{cm}$  の位置における  $y_s$  は  $c$  が変化してもほぼ同じであること、および、 $c=0$  と  $3.3 \text{ mol/l}$  の場合を除いて、同じ  $\theta$  における固液共存相の厚み ( $y_l - y_s$ ) は平衡状態図から予想されるように低濃度の場合ほど大きいことがわかる。

なお、これらの実験では、 $t_w$  が一定であり、また、

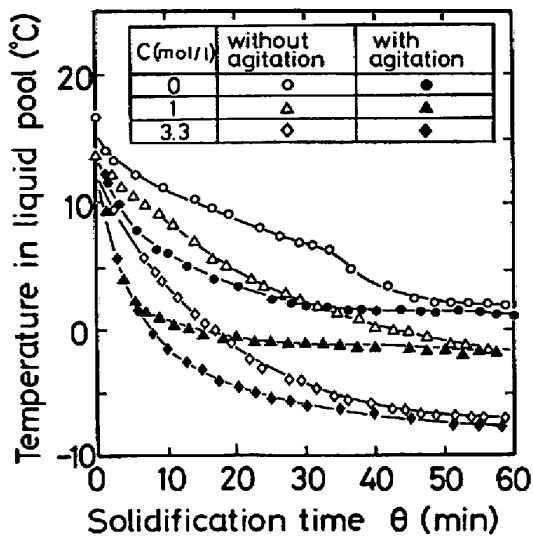


Fig. 12. Effects of the agitation on the changes in the temperature in liquid pool observed under the various conditions of  $t_w$  and  $t_0$  as shown in Fig. 13.

固相線温度が  $c$  に無関係に同じであること、および、 $x = 8\text{ cm}$  における  $y_s$  の値が  $c$  に依存せずにほぼ同じであることから、 $x = 8\text{ cm}$  では水平方向における固相内の温度分布は  $c$  によらずにほぼ等しいものと考えられる。したがって、 $c$  の変更によつて自然対流の差異は起こるが、 $x = 8\text{ cm}$  のところでは、この差異は固相内の温度分布にほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

しかしながら、 $x = 16\text{ cm}$  の位置における  $y_s$  の値は  $c$  が共晶濃度に近い場合ほど大きくなるために、 $x = 8\text{ cm}$  と  $x = 16\text{ cm}$  の各位置における  $y_s$  の値に差異が生じて固相線面も垂直面から傾いている。Fig. 11 に、湯面より下方へ  $8\text{ cm}$  の位置から  $16\text{ cm}$  の位置までの区間における  $\beta_l$  と  $\beta_s$  の経時変化を示す。Fig. 11 から、同じ  $\theta$  における  $\beta_l$  と  $\beta_s$  はともに、 $c$  が共晶濃度が近い場合ほど大きくなるのがわかる。

### 3.4 攪拌の効果

液相内の温度分布と凝固前面に沿つて下降する自然対流との間には相互作用が存在するが、温度分布も自然対流も液相内を攪拌することによつて消失させることができる。ここでは、液相の過熱の除去速度や凝固速度に及ぼす自然対流の効果と強制攪拌の効果との差異を検討するため、鑄込み部へ攪拌棒を垂直に入れ、垂直のまま攪拌棒を水平方向へ往復運動させることによつて液相を攪拌しながら凝固実験を行なつた。この際、攪拌の程度は、自然対流が消失する程度のものであつた。

液相内の温度の経時変化に及ぼす攪拌の効果を Fig. 12 に示す。これらの温度はすべて Fig. 1 の ③ の位置で

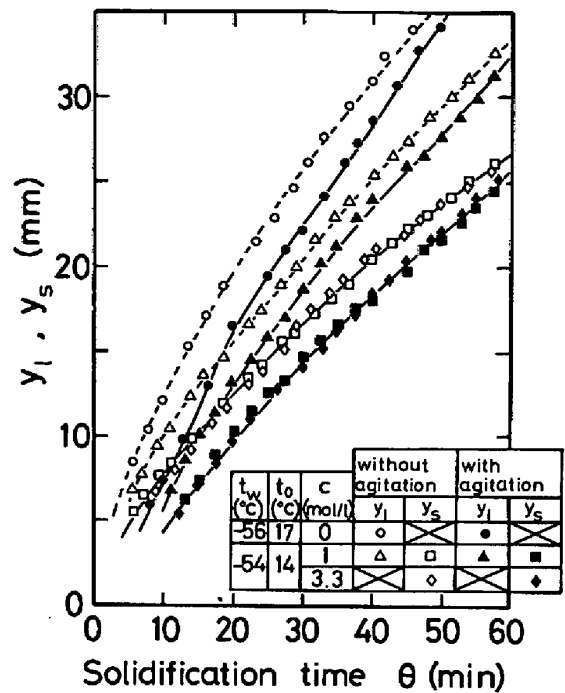


Fig. 13. Effects of the agitation on the progresses of the liquidus plane and the solidus plane.

実測したものである。Fig. 12 から、攪拌を加えた場合の液相内の温度は、攪拌を加えない場合に比べてより速やかに降下することがわかる。また、攪拌を加えた場合には、Fig. 1 における ①～③ の各位置の温度がほぼ同一であつたことから、液相内の温度は凝固前面近傍を除いてはほぼ均一と考えられる。

湯面から  $8\text{ cm}$  の位置における  $y_l$  と  $y_s$  の経時変化を Fig. 13 に示す。本研究で着目した  $\theta = 0 \sim 60\text{ min}$  の範囲内では、同じ  $\theta$  における  $y_l$  と  $y_s$  は攪拌を加えない場合の方が大きい、 $\theta$  の経過に伴つて、攪拌を加えた場合の凝固速度は攪拌を加えない場合の凝固速度より大きくなるために、攪拌を加えた場合の  $y_l$  と  $y_s$  は攪拌を加えない場合の  $y_l$  と  $y_s$  へ徐々に接近する傾向があることが Fig. 13 からわかる。

なお、攪拌を加えた場合には、液相内の温度分布がほぼなくなつて、上下方向で液相温度がほぼ一定に保たれるため、凝固界面は湯面近くのものを除いてほとんど垂直であつた。

## 4. 蒸留水の凝固実験

従来、結晶成長に関する研究<sup>11)</sup>、連続鑄造における最適な注入ノズルを開発するための研究<sup>12)</sup>、および、リムド鋼の凝固時における気泡発生に関する研究<sup>13)</sup>などにおいて、水の凝固実験が採用された。ここでは、自然対流が凝固現象に直接影響を及ぼす顕著な事例として、蒸留

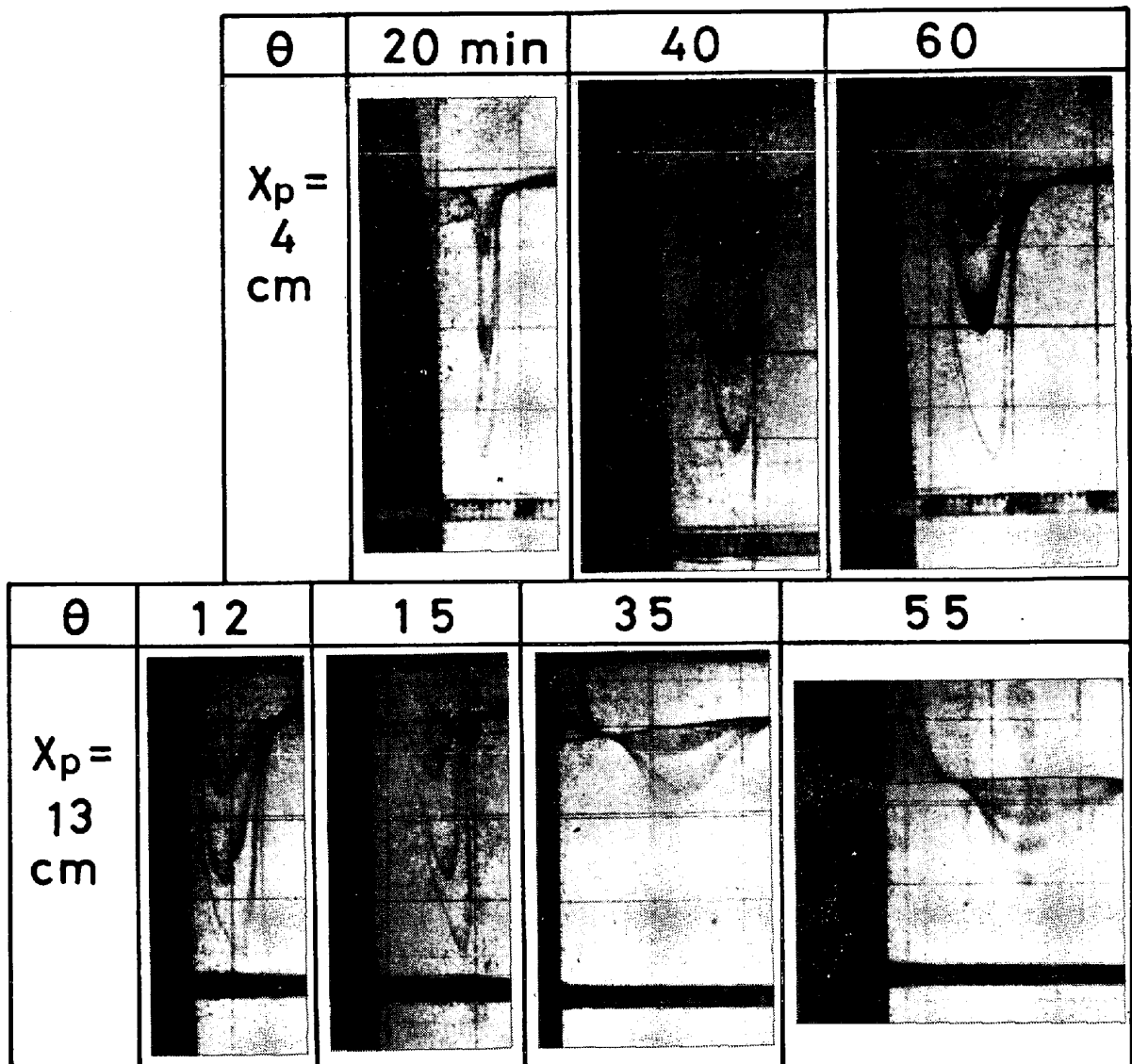


Photo. 1. Natural convection at the various solidification times ( $\theta$ ) and the location ( $x_p$ ) where a pulse was charged. ( $c=0$  mol/l,  $\theta'=20$  sec)

水の凝固実験で観察した凝固前面上の気泡の集積現象について検討する。

凝固時間  $\theta$  の経過に伴う自然対流の推移について、湯面から下方へ 4 cm および 13 cm の各位置でタイムラインを発生させ調べた結果を Photo. 1 に示す。ここで、タイムラインの発生間隔は 5 sec であり、最初にタイムラインを発生させてから 20 sec 後に写真撮影を行なった。この凝固実験では蒸留水の密度が 4°C で最大となるため、凝固前面に沿って上昇流が存在し、凝固前面から少し離れたところに下降流が存在するが、Photo. 1 から、 $\theta$  の経過に伴って凝固前面に沿った上昇流が顕著となってくるのがわかる。なお、下向きのタイムラインの先端を結んだ線はほぼ 4°C の等温線に相当すると考えられる。

蒸留水の凝固実験では、上昇流に伴って、凝固前面に沿って多数の微小気泡が浮上する現象が観察されたが、これは凝固前面に付着している気泡が離脱したためである。なお、蒸留水以外の KCl 溶液の凝固実験では、気泡の浮上は全く認められなかった。これは、主として、KCl 溶液の濃度が増加すると気体の溶解度が減少し、固体中と液体中における気体の溶解度の差に起因する凝固時の放出ガス量も少なくなるためと考えられる。

湯面上の凝固前面に近い位置にトレーサー(黒インク)を点源として添加すると、凝固前面に沿って下降するトレーサーの挙動が観測されるが、このトレーサー実験の結果を Photo. 2 に示す。Photo. 2 から、湯面から下方のある  $x$  の位置で自然対流の境界層の剝離現象が生じており、この剝離点は  $\theta$  の経過に伴って上方へ移動すること

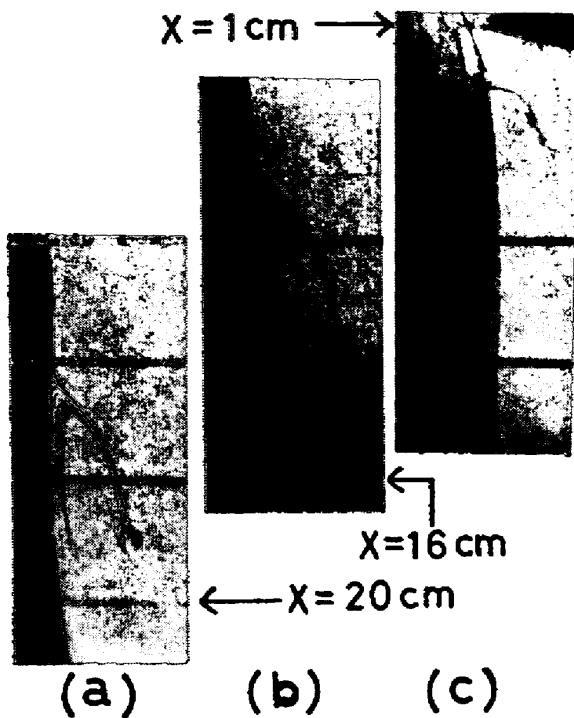


Photo. 2. Boundary-layer separation observed in the casting run with a distilled water. ( $t_0=13^\circ\text{C}$ ,  $t_w=-60^\circ\text{C}$ , (a) $\theta=12$  min, (b) $\theta=25$  min, (c) $\theta=32$  min)

がわかる。また、境界層の剝離現象とともに、トレーサーによつて示される流跡線の下方に渦が生じていることが Photo. 2(a)で認められる。さらに、凝固前面に沿つて下方から浮上してきた微細な気泡は剝離点近傍の凝固前面に捕捉されやすく、この結果として、Photo. 2(c)で凝固相内に黒い右上りの線として識別できるような気泡集積面が形成される。

この気泡集積面についてさらに検討を加えるため、 $t_0=17^\circ\text{C}$ で、冷却槽温度が  $t_w=-46^\circ\text{C}$ ,  $-56^\circ\text{C}$ , および  $-66^\circ\text{C}$ の各場合について凝固実験を行なつた結果、 $t_w$ が低い場合ほど液相内の温度は早く低下すること、および、 $t_w$ が低い場合ほど同一の  $\theta$ における凝固厚みおよび凝固速度は湯面から下方の位置に無関係に増加することがわかつた。しかし、気泡集積面の生成速度は  $t_w$ が低い場合ほど早い、固相内に生成された気泡集積面の位置 ( $x, y^*$ ) は、 $t_w$ を上述のように変化させても、Photo. 3(a)に示したものとほとんど変わりなかつた。この理由としては、 $t_w$ が低い場合ほど、液相内の温度が早く低下し剝離点はより早く上方へ移動するが、一方、剝離点近傍の凝固速度もより大きくなるためと考えられる。

なお、Photo. 3(a)において、左下から右上へ伸びて

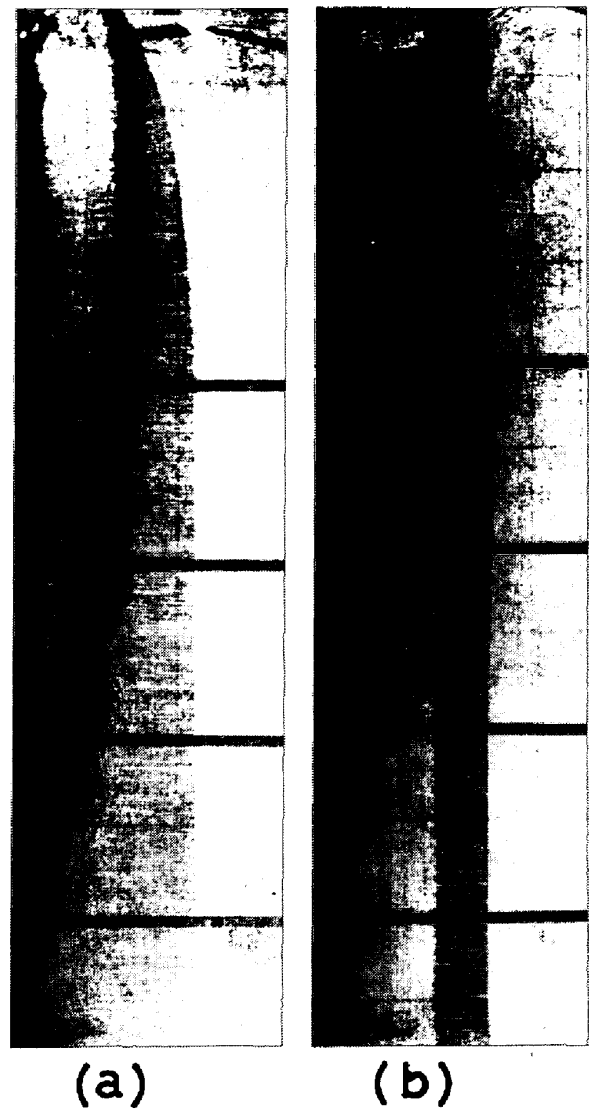


Photo. 3. Curved plane which is consisted of many small bubbles accumulated in the solid shell and needle blowholes observed in the casting run with a distilled water. ( $t_0=17^\circ\text{C}$ ,  $t_w=-56^\circ\text{C}$ , (a) without agitation, (b) with agitation for forty minutes)

いる黒い線が気泡集積面であり、湯面の比較的近くでは鑄壁側へ近づく傾向がある。また、気泡集積面の左右で水平方向に伸びている多数の細い線は針状気泡であり、気泡集積面の左側近傍の針状気泡は多少右上に、また、右側近傍のものは多少右下に伸びており、KCl 溶液の凝固実験で観察された流れに対するデンドライトの偏向の傾向と同様な傾向が見られる。

ここで、凝固時間が  $\theta$ で湯面から  $x$ の位置における凝固厚みを  $y_l(\theta, x)$ として剝離点の位置 ( $x=x'$ ,  $y=y'$ )の移動に関する微分収支を行なうと、凝固後の気泡集積面の形状に対して(1)式が得られる。



$$dy^*/dx = -R/u + \tan \beta_l \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $y^*$  は湯面から任意の  $x$  の位置における鑄型から気泡集積面までの距離であり、 $dy^*/dx$  は垂直方向に対する気泡集積面の勾配である。また、 $R$  は剝離点における凝固前面水平方向への移動速度（凝固速度）、 $u$  は主として液相内の温度分布の経時変化に依存する剝離点の上方への移動速度、 $\beta_l$  は剝離点における凝固前面の垂直面からの傾き角であり、それぞれ  $R = \partial y_l(\theta, x) / \partial \theta$ 、 $u = -dx'/d\theta$ 、および、 $\beta_l = \tan^{-1} \{ \partial y_l(\theta, x) / \partial x \}$  で定義される。

したがって、(1)式より気泡集積面のプロファイルは上述の  $R$ 、 $u$ 、および  $\beta_l$  に依存することがわかる。また、Photo. 3 (a) に示した気泡集積面に関しては、おおよそ  $x=4$  cm で  $dy^*/dx=0$  あり、この位置よりも上部では  $dy^*/dx > 0$ 、および、下部では  $dy^*/dx < 0$  であるが、凝固前面が湯面から底部まで垂直である場合 ( $\beta_l=0$ ) には、(1)式から  $dy^*/dx < 0$  となり、したがって気泡集積面が湯面近くで鑄壁側へ近づくということは起こらないことがわかる。さらに、Photo. 3 (a) でおおよそ  $x=12\sim 20$  cm の区間における気泡集積面では  $dy^*/dx =$  一定であり、さらに、蒸留水の凝固実験ではこの区間における凝固前面の傾き角は非常に小さい ( $\beta_l \approx 0$ ) ため、(1)式から  $R/u$  が一定となり、剝離点における凝固前面の凝固速度と剝離点の上方への移動速度の比がほぼ一定であることがわかる。

大型実用鋼塊に見られる逆V偏析の生成原因については、従来より多くの説明<sup>9)</sup> がなされているが、最近の研究<sup>14)15)</sup> では凝固前面に排出された溶質濃化溶鋼の浮上が主原因と考えられており、特に、逆V偏析線の傾斜角が水平方向の凝固速度と濃化溶鋼の浮上速度との比で決定されるということを定量的に取り扱っている報告<sup>16)17)</sup> もある。ここで、逆V偏析の生成が濃化溶鋼の浮上によるという説に従うならば、(1)式で、本実験における境界層の剝離点の上方の移動と濃化溶鋼の浮上とを入れ換えることによって、逆V偏析線の形状の説明に上述の気泡集積面の形状に関する(1)式が適用できるものと考えられる。したがって、鋼塊上部において逆V偏析線が鑄壁側へ傾いている現象については、既に成田ら<sup>14)</sup> によつて定性的に説明されているように、上述した濃化溶鋼の浮上速度や凝固速度とともに凝固前面の垂直面からの傾きを考慮することが必要になると考えられる。

上述の境界層の剝離現象は凝固前面付近の液相を攪拌することによつて起こらなくなり、また、この攪拌によつて凝固前面で成長している気泡も容易に離脱浮上するために、凝固後の固相内には針状気泡や気泡集積面は見

られなくなる。この例を Photo. 3 (b) に示す。ただし、この場合は  $\theta = 0\sim 40$  min の凝固時間内だけ攪拌を加え、凝固時間が約 60 min 経過した時点で Photo. 3 (b) を撮影した。Photo. 3 (b) から、攪拌することによつて針状気泡や気泡集積面が消失すること、湯面付近を除いて凝固前面がほぼ垂直になること、および、攪拌を終了した時点より針状気泡が再び成長し始めることがわかる。なお、Photo. 3 (b) において、 $\theta = 0\sim 40$  min の凝固時間内で凝固した固相内に見られる上下方向の黒点線は、凝固前面と鑄込み部の壁面からなる隅部に捕捉された気泡の映像である。

## 5. 結 言

凝固系として KCl 溶液と蒸留水、および、自然対流を可視化する実験技術としてチモールブルー法を採用して、種々の凝固条件下で自然対流の最大流速、凝固厚み、および液相内の温度を実測し、以下の結果を得た。

(1) 注入温度が高い場合ほど同一凝固時間における自然対流の平均最大流速は大きくなり、このために、液相内の温度の降下速度や凝固界面の垂直面からの傾き角は大きくなるが、凝固初期の凝固速度は減少する。

(2) 冷却槽温度が低い場合ほど液相内の温度は早く低下し、また、凝固速度や凝固界面の傾き角もそれぞれより大きくなるが、同一凝固時間内における最大流速には大きな変化は現われない。

(3) 注入温度や冷却槽温度がそれぞれ同じであつても同一凝固時間における最大流速は共晶濃度に近い場合ほど大きくなるために、液相内の温度降下速度や凝固界面の傾き角も増大する。

(4) 液相を強制的に攪拌しながら凝固を行なうと、液相の過熱の除去は攪拌しない場合よりも速やかに行なわれるが、凝固の比較的初期における凝固速度は小さくなり、また、凝固界面は湯面付近を除いてほぼ垂直となる。

(5) 蒸留水の凝固実験で観察される気泡集積面の形状は境界層の剝離点における凝固速度、剝離点の上方への移動速度、および凝固前面の傾き角に依存する。

## 文 献

- 1) G. S. COLE and W. C. WINEGARD: J. Inst. Metals, 93 (1964—65) 5, p. 153
- 2) G. S. COLE and G. F. BOLLING: Trans. Met. Soc. AIME, 233 (1965), p. 1568
- 3) M. C. FLEMINGS: Solidification Processing, (1974), p. 224 [McGraw-Hill]
- 4) G. S. COLE: Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967), p. 1287

- 5) J. SZEKELY and P. S. CHHABRA: *Met. Trans.*, 1 (1970), p.1195
- 6) 浅野, 松永: 鉄と鋼, 56 (1970), p.1916
- 7) 満尾, 堀籠, 斉藤, 野村, 北村, 河野: 鉄と鋼, 57 (1971), p.915
- 8) 垣生, 江見, 北岡: 鉄と鋼, 60 (1974), S 70
- 9) 宮沢, 鞭: 鉄と鋼, 62 (1976), p.836
- 10) 宮沢, 鞭: 鉄と鋼, 62 (1976), p.210
- 11) E. S. MIKSCHE: *Trans. Met. Soc. AIME*, 245 (1969), p.2069
- 12) N. T. MILLS and L. F. BARNHART: *J. Metals*, 23 (1971) 11, p.37
- 13) P. ROCQUET, J. C. ROSSI, and J. A. GIRONNE: *ibid*, 19 (1967) 8, p.57
- 14) 成田, 谷口: 鉄と鋼, 56 (1970), p.212
- 15) 田代, 轟木, 木村: 鉄と鋼, 57 (1971), p.1654
- 16) 真鍋, 丸川, 白石: 学振 19 委資料, No. 9763 (1974)
- 17) 鈴木, 宮本: 学振 19 委資料, No. 9800 (1975)