

## 論 文

## 大型鋼塊の凝固および偏析に関する研究 (I)\*

(bar test 法による鋼塊凝固速度の直接測定)

守川平四郎\*\*・小野寺真作\*\*\*・荒木田豊\*\*\*

STUDIES ON THE SOLIDIFICATION AND SEGREGATION  
OF LARGER STEEL INGOTS (I)

(Direct Measurement of Solidification Rate by Bar-Test)

*Heishiro Morikawa, Shinsaku Onodera and Yutaka Arakida*

## Synopsis:

Upon the problems involved in the study of solidification and segregation of larger steel ingots numerous papers have hitherto been published. Nevertheless their nature is still vague from both scientific and practical points of view.

The authors intend to throw more light upon this problem in a series of observations, measurements and calculations dealing with actual ingots.

In this 1st paper, they report the vertical solidification rate of more than 40 killed, concave and octagonal, ingots ranging from 3 to 75 tons, measured by the bar-test method with 9 mm dia. mild steel.

The result showed typical solidification curves for various sizes, effect of composition upon the observed solidification rate, relation between solidification rate and nominal ingot size, effect of bottom shape on the solidification curve, change of temperature in feeder heads during solidification, etc. An analytical study on the solidification curve was also presented.

## I. 緒 言

大型鋼塊の凝固および偏析については、諸家の老大な研究調査結果が発表されているが、しかし造塊法あるいは鋼塊内部の諸欠陥が劃期的に改善されたというわけではなく、問題の本性はマクロ的にもミクロ的にも依然として不明のまゝであるといつて過言ではなからう。

熔鋼の物理的特性値の測定、凝固した鋼塊内部の詳細な観察、異物質による小型のモデル実験、あるいは非金属介在物の挙動のみの調査など、従来の方法には何か検討の余地はないであろうか。たとえこれらの詳細を知り得ても、それが鋼塊全体としての differential freezing の解明、あるいは偏析および欠陥の低減に直結するとはいえない。われわれは真空造塊法の工業的実施の時代に入る前に、いま一度大型鋼塊の凝固の問題を見直しておく必要を痛感する。

この研究では実際の鋼塊の内部での凝固および偏析の

進行過程についての観察、測定、あるいは計算を行うことによつて実証的に考察を進めた結果を報告し、大型鋼塊の工業的生産技術の進歩にいささかなりとも寄与せんとするものである。

第1報はいわゆる bar test 法によつて実際の鋼塊の軸心にそつた垂直方向凝固速度を測定した結果であり、酸性平炉熔解の 3~75 t 8 角型キルド鋼塊 40 余本を主として対象とした。

鋼塊の凝固速度の測定方法には、この外にも dumping test 法<sup>1)2)3)</sup> radio isotope を使用する方法などがあり、それぞれ一得一失があるが、実際の凝固をなるべく数多く、なるべく少い費用で調べるといふ立場から bar test 法によることとした。

測定はほとんどすべての製品に振当てられた鋼塊につ

\* 昭和 31 年 10 月本会講演大会(広島)にて発表

\*\* 日本製鋼所室蘭製作所製鋼部熔鋼工場長

\*\*\* 同 上 研究部

いて、いわば非破壊的に行い、鋼種（炭素鋼および低合金鋼）、熔解方法、鋼塊形状および鑄込条件が多少異なる場合を含むものであつたが、後述のごとく、実際的に興味のあるいくつかの事実が明らかにされた。

## II. 測定方法

ケース台、インゴット・ケース、押湯棒を組立て、押湯棒上端に古レール数本を渡して測定足場および基準面とする。ケース台内側底面から押湯棒上端までの高さを測定し、これをHとする。

二人の測定者の一人が長さLの軟鋼棒（9cmφ、表面を粗研磨して清浄とする）を鋼塊軸心沿いに手早く落とし込み、その先端が凝固部上面に突当つたならばさらに0.5~2kg程度の力で軽く押し、凝固面を確認の後レール下面沿いに他の一人が棒にマークし、ふたたび手早く抜く。Fig. 1の測定値H, L, Aより

$$\text{凝固高さ} = H - (L - A)$$

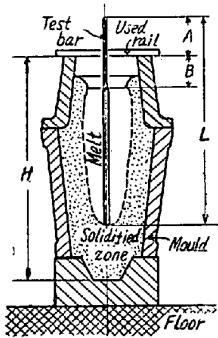


Fig. 1.  
Measuring layout

測定の要点は次のごとくである。

1) 棒の浸漬時間：許容浸漬時間は12~14秒で、これ以上長くなると引抜く途中、または引抜いた直後に棒が軟化切断するおそれがある。測定に必要なのは5m級の棒を使用する場合（50t以上の鋼塊の凝固初期）でも8, 9秒以下で、落とし込みおよび引抜きにそれぞれ2秒以下、マーキングに3~5秒である。詳細は第2報以後にふたたびのべる。

なお棒の直径は、測定に必要な時間浸漬しても切断しないこと、附着凝固した熔鋼のために引抜きが困難にならないことの2条件を考慮してきめたものであり、最近の報告を見ると、ドイツでは12mm<sup>φ</sup>、アメリカでは5mm<sup>φ</sup>の軟鋼棒を使用した例がある。

2) 凝固面の確認：固液界面の手応たえは意外に確かであり、上述のごとく若干押ししても普通1~2cm進むに過ぎない。したがってえられた時間-凝固高さ曲線はか

なり信頼しえるものといひ得、またこの曲線の小さな凹凸は凝固の非軸対称性、棒が軸心から多少ずれること、あるいは凝固進行の脈動性などによっても推論される。

ただし例外的には数cm以上も押し込み可能の場合があり、これは鋼塊本体高さの下から1/2~2/3位の部分に現われることが多い。急速に発生した凝固の核がsuspendしているような箇所ではないか、と想像される。

3) 測定長さの温度補正：熔鋼中に浸漬中の棒の温度を1200~1300°Cとすると、この部分は1mにつき約15mm伸びることになる。しかし測定長さはいずれも室温に近い温度におけるものであるから、得られた結果に対する温度補正の必要はないといえる。

4) 製品々質への影響：二つの相反する考え方があり  
(i) 棒によつて鋼塊は内部からも冷却される。これは望ましい。

(ii) 凝固寸前の、粘度が高く、核の発生している部分に棒を入れて刺戟すると、局部的に凝固が生じ、しかも熔鋼はこれにfollowしないのではないか。これは欠陥の発生を助長することになる。

であるが、3, 4年前に行つた数本の試験結果に異常のなかつたことに力を得、bar testを行つた鋼塊による製品を超音波探傷法その他により監視しつつstep by stepに試験を進めた結果、製品々質に悪影響をおよぼさないと確信するに至つた。

逆にbar test法は一つの非破壊的な調査法として、将来広範囲に利用し得るものと期待される。これらの点については後の報告で詳述したい。

## III. 測定結果

測定した約40本の鋼塊の化学成分、形状、熔解および鑄込条件、完成製品の検査成績などについては紙面その他の都合で割愛せざるを得ないが、測定結果の中から主なものを列挙するとつぎのごとくである。

### i) 代表的凝固曲線

Fig. 2は代表的な時間-凝固高さ曲線を示す。3t, 9t, 18tと次第に凝固時間は長くなり、30tでは6時間、75tでは13時間に達する。凝固曲線の形状は18t位までは急に立上つたままであるが、鋼塊がさらに大きくなると本体上端の若干下のあたりで次第に水平方向に傾きを増す。しかして20~30t鋼塊の一部には凝固曲線の途中に水平部分のあらわれるものもある。筆者らはこれを“棚を吊る”と称している。またFig. 2で“K”

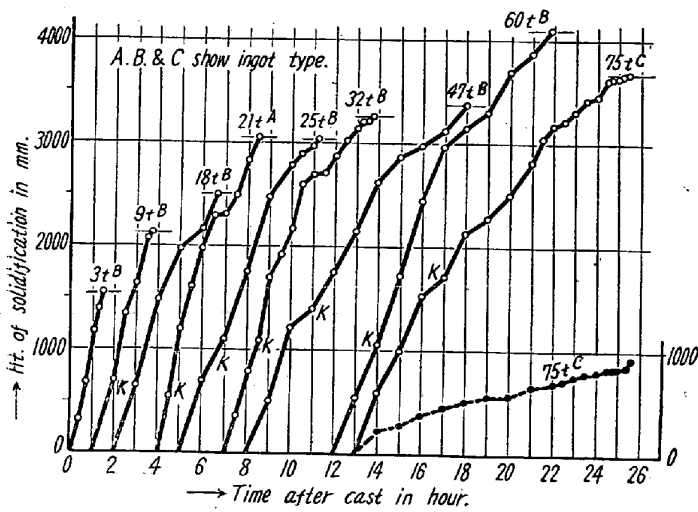


Fig. 2. Representative solidification curves of ingots ranging from 3t to 75t.

と示してある鋼塊下部の軽い曲りはほとんどすべての鋼塊に見られる。

なお Fig. 2 の点線は同図の 75 t 鋼塊に対する押湯々面の引けを示す。参考のために一例のみを記入しておく。

従来発表されているこの種の測定結果はせいぜい 15~18 t 迄のものであり<sup>2)3)4)</sup>, dumping test または bar test によつては、これらの報告の曲線に筆者らの測定結果を組合せて、鋼塊サイズが 7 t, 18 t, 32 t, 75 t と増大する場合の軸心凝固曲線の典型を示せば Fig.

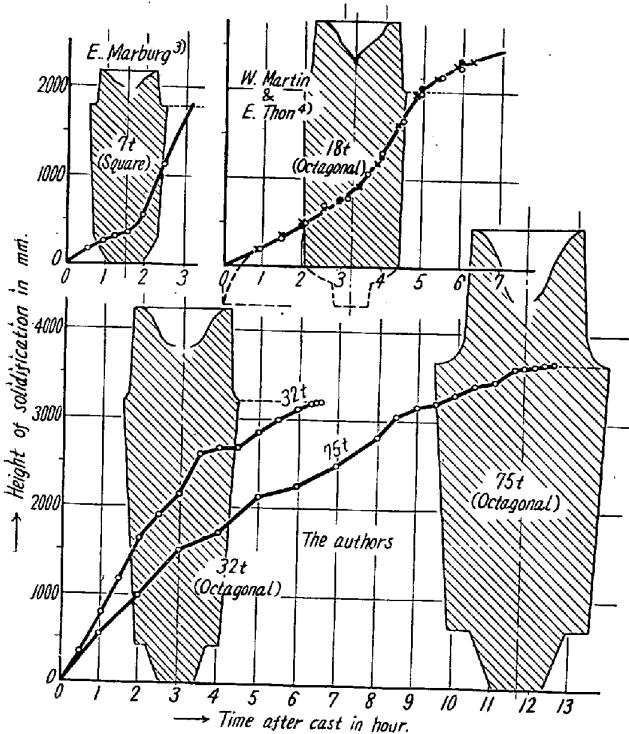


Fig. 3. Typical solidification curves in review; features for various sizes.

3のごとくであり、鋼塊上半部で水平の傾きを増す部分の高さが、鋼塊の大きくなる程下方に移動するのは注目すべき点である。“棚吊り”現象と鋼塊下部における Knick については次節で解析する。

ii) 鋼種と凝固速度

同一鑄型形状および同一押湯高さの場合、炭素鋼と低合金特殊鋼の凝固速度にはほとんど差がなく、鑄込条件に多少の差はあつても、本体凝固完了に要する 5~10 時間について 10 分前後の差しかないように思われる。さらに詳細な点については後に報告したい。

iii) 公称重量と凝固時間

両者の関係を Fig. 4 に示す。この図ではある鋼塊重量に対する凝固所要時間にかんがりの巾があるが

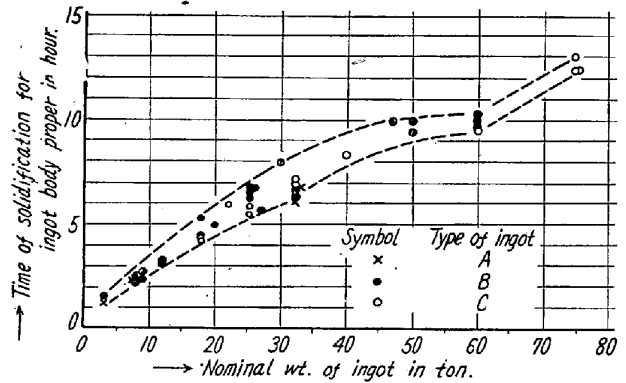


Fig. 4. Relation between solidification time and ingot size.

いま試みに鋼塊本体単位重量当りのケース表面積を横軸に取つて見ると、Fig. 5のごとく、きわめて整然たる結果が得られる。横軸の量は鋼塊形状の差—大きさと高径比—を表わす一つの specific な値として種々利用出来ることと思う。なおまた横軸の量を、ケースの熱容量

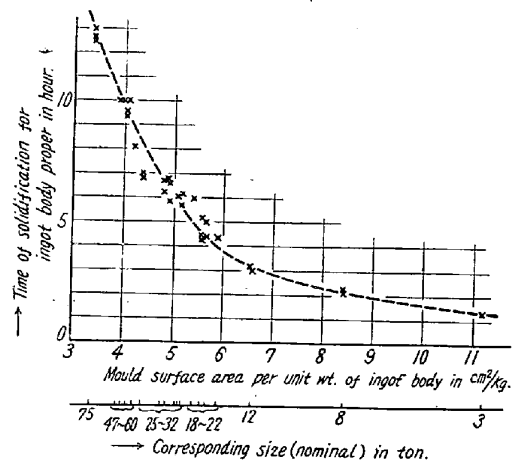


Fig. 5. Relation between solidification time of ingot body, and mould surface area per unit wt. of the ingot body.

と側面表面積との関係に変換して考えると、曲線の形状としては当然のことである。

iv) 凝固初期の凝固高さ

Fig. 6 には、鑄込後 1, 2, 3 時間経過後の凝固高さ と鋼塊公称重量との関係を示す。図から 20 t を越す鋼塊では、鑄込後 1~2 時間の垂直方向凝固速度はほぼ一様で、さらに時間が経過すると、大きな鋼塊程凝固速度の低下することが知られる。この結果は鑄込条件の影響を研究する際に注目すべき点である。



Fig. 6. Relation between nominal ingot size and solidification height in early hours after cast.

v) 押湯温度の変化

押湯の温度は、Fig. 7 に示すごとく、鑄込後の時間経過とともに次第に低下する場合と、凝固が進行して押湯々面が引いて行つても押湯々面直下の温度は低下せずにある値に保たれている場合とがあることが見出された。第 2 報にのべるように、凝固の進行とともに C, P, S 等の元素がこの部分に濃化するから、この温度が如何なる意味のものであるかいまのところはつきりしないが今後の研究課題として興味深い。

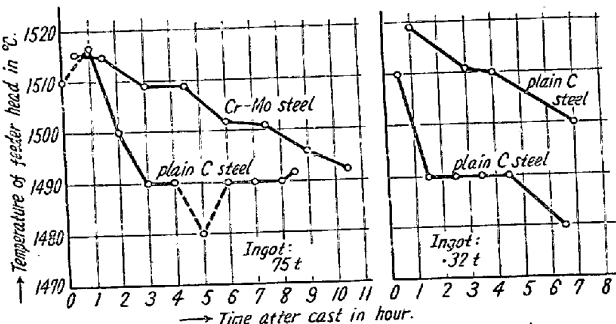


Fig. 7. Drop of temperature in feeder head tops.

IV. 凝固曲線の解析

前節 i) にのべた凝固曲線の二つの凹凸一下部の軽い曲がり と 20~30 t 鋼塊における棚 (より大型の鋼塊で

は水平方向への傾きの増加) 一の成因について、熱伝導の面から定性的な解釈を行つて見る。

鋼塊凝固の熱伝導問題は

- 1) 凝固熱の放出
- 2) 鋼塊と鑄型との空隙
- 3) 単純ではない形状

などのためにまだ完全には解かれていないが、簡単のために凝固熱の放出がなく、鋼塊と鑄型との間の空隙がないとし、かつまた鋼塊と鑄型の形状と境界条件とを Fig. 8 のごとく単純化してこの問題を解くと次式を得る\*。

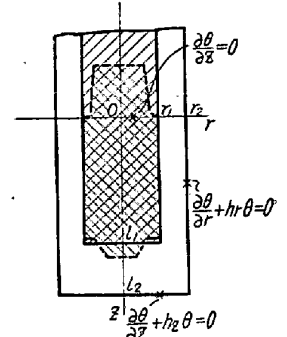


Fig. 8.

$$\theta = T_0 + \frac{4(\theta_0 - T_0) r_1}{r_2^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\kappa(k_m^2 + \alpha_n^2)t}$$

$$\frac{\sin k_m l_1}{k_m l_2 + \frac{h_z}{k_m} \cos^2 k_m l_2} \cos k_m z \cdot \frac{\alpha_n J_1(\alpha_n r_1)}{\alpha_n^2 + h_r^2 [J_0(\alpha_n r_2)]^2} J_0(\alpha_n r) \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $\theta$ : 時刻  $t$ , 場所  $(r, z)$  の温度,  $^{\circ}\text{C}$

$\theta_0$ : 鑄込温度  $^{\circ}\text{C}$

$T_0$ : 室温  $^{\circ}\text{C}$

$r_1, r_2, l_1, l_2$ : Fig. 8 の寸法, m

$h_r, h_z$ : Newton 輻射の恒数, 1/m

$\kappa = \frac{k}{C\rho}$   $k$ : 熱伝導率, kcal/mh  $^{\circ}\text{C}$  } 熔鋼と凝固鋼との平均値  
 $C$ : 比熱, kcal/kg  $^{\circ}\text{C}$   
 $\rho$ : 比重量, kg/m<sup>3</sup>

$k_m, \alpha_n$ : それぞれ次の式 (2) および (3) を満す値とする。

$$\tan k_m l_2 = \frac{h_z}{k_m} \dots \dots \dots (2)$$

$$\alpha_n J_1(\alpha_n r_2) - h_r J_0(\alpha_n r_2) = 0 \dots \dots \dots (3)$$

今、25 t 鋼塊の場合をとり、Fig. 9 のごとく形状を単純化して

$$r_1 = 0.575 \text{ [m]}, \quad l_1 = 2.5 \text{ [m]}$$

$$r_2 = 0.81 \text{ [m]}, \quad l_2 = 3.0 \text{ [m]}$$

とし、また

$$k = 23.5 \text{ [kcal/mh } ^{\circ}\text{C]}$$

$$C = 0.18 \text{ [kcal/kg } ^{\circ}\text{C]}$$

$$\rho = 7250 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

より

\* 解法の要点は文末の補遺に述べる。

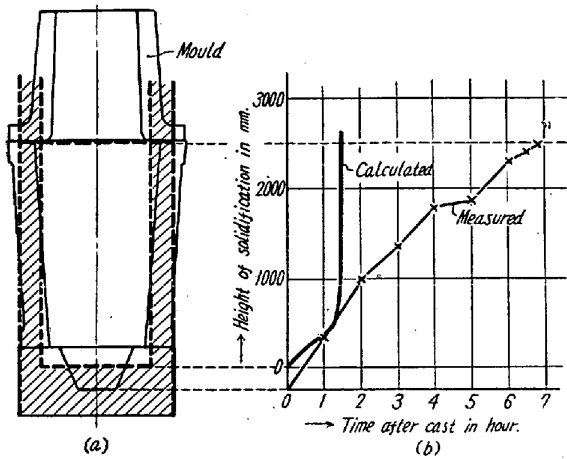


Fig. 9. Calculated and measured solidification curves for a 25t ingot.

$$\kappa = \frac{k}{C \rho} = \frac{23 \cdot 5}{0.18 \times 7250} = 0.018 \text{ [m}^2/\text{h]}$$

とし、なお

$$\theta_0 = 1550 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\text{凝固点} = 1480 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h_r = h_z = 1.5 \text{ [1/m]}$$

として数値計算すれば、図の太い実線のごとき時間一凝固高さ曲線(軸心)が得られる。細い線は実際の測定結果を示すが、計算では1時間30分足らずで1000mmの高さ迄凝固する(その上の部分も同様に凝固終了)のに対して、実際には6時間半余を要している

両曲線の差は、鋼塊と鋳型との間の半径方向空隙、凝固熱の放出、テーパー、鋼塊底部の形状などに注目して

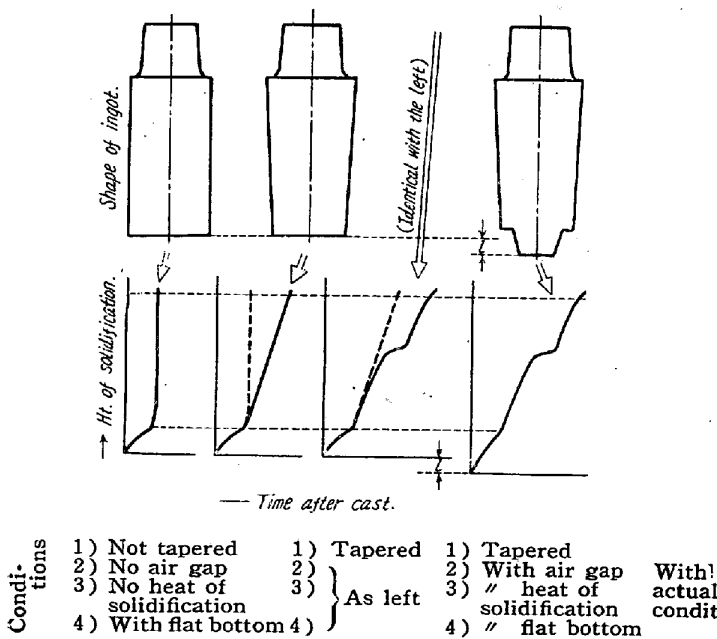


Fig. 10. A qualitative explanation of solidification curve.

定性的に考察すれば、Fig. 10のごとくにして説明される。Fig. 10から明らかなように、凝固曲線の二つの曲がりはその由来するところが同一ではなく、下の方の曲りは主として鋼塊底部の形状に影響されるのに対し、“棚を吊る”部分の曲りは凝固熱放出速度の局所的な増大を示すものであり、押湯杵をも含めた鋼塊頂部の形状によつて影響される。と推論し得るであろう。

すなわち Fig. 11にて凝固がC点まで進む頃、残った熔融部の温度が一斉に凝固点に接近するが、鋼塊が大きいと外面への熱の放散が充分でないために、凝固速度は急に低下して場合によつては凝固は停滞し、しかる後にふたたび凝固の速度を回復して上端に至る。と考えられる。

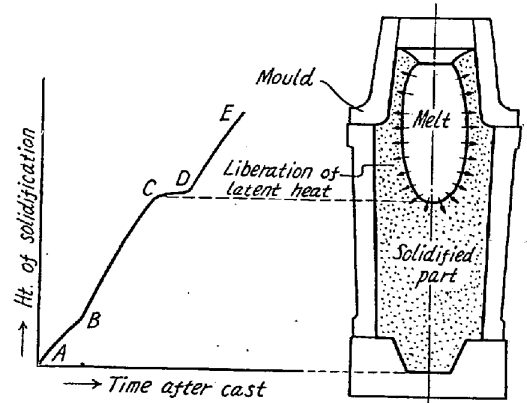


Fig. 11. Retarded solidification just below the feeder head.

## V. 結 言

bar test 法によつて大型鋼塊軸心部の凝固速度を直接、かつ非破壊的に測定し、熔解条件、化学成分、形状および鋳込条件の多少異なる3~75t 8角型キルド鋼塊(酸性平炉熔解)約40本についての試験により、つぎの諸点を知り得た。

1) 同一鋳型の場合、炭素鋼と低合金鋼の凝固速度にはほとんど差がないように思われる。

2) 鋼塊重量と本体上端凝固所要時間との関係をもとめた。これを、本体単位重量当りケース表面積(外面)と凝固時間との関係としてplotするとはなはだ整然たる曲線が得られ示唆が多い。

3) 20t以上の鋼塊では鋳込後1~2時間の凝固高さはほとんど変わらないが、さらに時間が経過すると、大きな鋼塊程凝固速度は低下する。これは凝固および偏析と鋳込条件との関係を研究する際に重量な点である。

4) 20t以上の鋼塊では凝固曲線の途中に二つの

曲がりがあることを見出した。その成因について簡単な解析を行い、下の方の曲がりには鋼塊底部の形状に由来し、上の方の曲がり（または“棚”）は凝固熱の急速な放出に基くものと推論した。上の方の曲がりには、従来より小型の鋼塊についての研究では認められなかつた事実である。

5) 押湯々面直下の温度の変化を測定し、鑄込後の時間が経過しても温度が低下しない場合もあることを見出した。

6) bar test 法は現場的に有用な非破壊的研究法である。

これらの結果はいずれも研究の端緒であり、さらに詳細な観察測定によつて確認し、究明すべき点が多い。次報以下に逐次報告の予定である。

最後に、この研究を指示され結果の公表を許可された株式会社日本製鋼所専務取締役柳武氏、ならびに同社室蘭製作所々長取締役皆川孝光氏に深甚なる敬意を呈するとともに、絶えざる御鞭撻と適切なる御教示とを賜つた室蘭製作所製鋼部長松本茂樹氏、ならびに研究部長下田秀夫博士に深く感謝する。また現場での測定は製鋼部熔鋼工場倉内実、吉本良悦、田辺潤平、伊藤光男、研究部第2課古沢正義、新井田豊雄の諸氏ならびに関係各位の御助力を得てはじめて可能であつた。こゝに同様心から御礼申上げる。(昭和32年6月寄稿)

補 遺

式(1)の誘導について

i) 式(1)の誘導

微分方程式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Z^2} \right) \dots \dots \dots (4)$$

初期条件は

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq r \leq r_1 \\ 0 \leq Z \leq l_1 \end{array} \right\} \text{にて } \theta = \theta_0$$

$$\left. \begin{array}{l} r_1 < r < r_2 \\ l_1 < Z \leq l_2 \end{array} \right\} \text{にて } \theta = 0 \dots \dots \dots (5)$$

境界条件は

$$r = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

$$r = r_2, \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} + h_r \theta = 0 \dots \dots \dots (7)$$

$$Z = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Z} = 0 \dots \dots \dots (8)$$

$$Z = l_2, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Z} + h_z \theta = 0 \dots \dots \dots (9)$$

式(4)の特解は、式(6)および(8)より

$$\theta \propto e^{-\kappa(k_m^2 + \alpha_n^2)t} \cos k_m Z J_0(\alpha_n r) \dots (10)$$

$k_m$  および  $\alpha_n$  はそれぞれ式(9)および(7)より式(2)および(3)のごとくにきまる。初期条件によつて積分常数を決定すると式(1)が得られる。

ii) 境界条件の式(8)について

押湯の部分は押湯枠内張煉瓦および湯面上の保温材(スラグも含む)によつて保温されているので、Fig. 8のごとく、鋼塊本体上端面はこれらの保温材および押湯によつて垂直方向に断熱されていると仮定した。

iii) 式(1)はさほど収斂が良くないが、一層収斂の早い形に直すこともできる。(昭和32年6月寄稿)

文 献

- 1) 1st Rep. Heterogeneity Committee, J. Iron Steel Inst., CX III (1926), p. 39~176
- 2) L. H. Nelson: Trans. ASM 22 (1934), p. 193~226
- 3) E. Marburg: J. Metals, Feb. 1953, p. 157~172
- 4) W. Martin & E. Thon: St. u. E., 75 (1955) S. 1765~1774
- 5) MFP 法 Manual より