

UDC 669.14-412-46 : 621.744.78 : 621.746.32 : 621.743

論 文

## 大型鍛造用中空鋼塊の開発\*

飯田 義治\*\*・山本 武美\*\*・山浦 茂義\*\*

朝生 一夫\*\*・松野 淳一\*\*\*・西岡武三郎\*\*\*\*

## Development of Hollow Ingot for Large Forging

Yoshiharu IIDA, Takemi YAMAMOTO, Shigeyoshi YAMAURA,  
Kazuo ASOH, Jun-ichi MATSUNO, and Takesaburo NISHIOKA

## Synopsis:

A new method to make hollow ingots was developed to produce cylindertype forgings economically.

The key-point of this method is the structure of the core which, consisting mainly of outer and inner steel pipes and intermediate special refractory, can readily be constructed, set in the mold and pulled out from the ingot, and which enables to control the cooling from inner surface of the ingot, without such defects as inner-side cracks.

Large hollow ingots up to 140 ton can be made by this method with less segregation than that of conventional ingots and with such small porosities that close and diminish at forging ratio of about 2.

Thus, hollow ingots are utilized as materials for high grade forgings, as pressure vessels, resulting in effective saving of production cost.

Compared with conventional ingots, hollow ingots have following characteristics of solidification;

(1) Total solidification time is short (2) Minimum solidification rate is high (3) Final solidification is not so rapid (4) Solidification from inner surface is slow.

Every feature in the internal quality of hollow ingot can be explained from these characteristics of solidification.

## 1. 結 言

圧力容器用素材等の円筒状鍛鋼品を製造する場合一般的に通常の中実鋼塊を据え込んで軸芯部をポンチで打ち抜いた後、穴ひろげまたは絞め付けを行う方法が用いられる。この方法は多数回の加熱、鍛造工程を必要とし、かつ製品に対する鋼塊歩留は一般的に低い。

このような欠点をなくすために、軸芯部が中空の鋼塊を製造し、これを鍛造する方法が考えられ従来より数多く提案されており代表的なものに、次のごときものがある。すなわち

(1) 鑄型の中央部に回転する水冷式中子を設け、鑄型と中子の間に溶鋼を供給し中子に接する凝固壁がある程度成長した後 中子を 連続的に上昇させて引き抜く方法。

(2) 鑄型の中央部に金属中子もしくは砂型中子を設

ける方法。

(3) 遠心鑄造法による方法。

(4) 鑄型の中央部に円形もしくは異形の水平断面を有する金属板中子に設置し、金属板中子の内部を中空として内部を水冷、冷却気体の吹込みもしくは輻射熱吸収体を入れたりもしくは充填することによつて凝固条件を調整する方法。

等の方法が公表されているが、中子の製作、据え付けの複雑さ、中空鋼塊の表面性状の不良および内面の割れなど問題があり、鑄造が困難であると考えられていた。

著者らは、中子構造について種々検討を加えた結果、中子をパイプと特殊耐火物で形成することにより抜き取りが容易で、かつ内面割れのない 140 t の中空鋼塊の製造に成功した。

これらの中空鋼塊の内質は、鋼塊内の偏析が通常の鋼塊と比較して軽微であり、かつザクも小さく鍛錬比 2 程

\* 昭和 54 年 4 月 本会講演大会にて発表 昭和 54 年 5 月 14 日 受付 (Received May 14, 1979)

\*\* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasakidori Kurashiki 712)

\*\*\* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

\*\*\*\* 川崎製鉄(株)本社 (Kawasaki Steel Corp.)

度で容易に圧着するという品質上の利点も兼ね備えていることが判明した。そこで中空鋼塊およびこれより製造した製品の内部性状の調査結果と凝固特性について解析したのでその結果を報告する。

## 2. 中空鋼塊の製造

### 2.1 鑄造用中子の条件

中空鋼塊製造上の要点は中空部を形成する中子の設計と鋼塊の鑄造法にある。なかでも中子は最も重要で、従来から数多くの中空鋼塊製造に関する発想があるにもかかわらず実用化に至っていないのは中子の形状、材質等に問題がある場合が多かった。

中子の具備すべき条件は、次のとおりである。

- (1) 中子の製作および据え付け段取り作業が容易なこと。
- (2) 中子側からの抜熱がある程度制御可能で鋼塊の2次パイプなどの内部欠陥を防止しうること。
- (3) 鋼塊内面に凝固収縮力による割れが発生せず、表面が美しいこと。
- (4) 鑄造中に溶損、破壊しないこと。

以上の諸条件を満たしかつ経済的に製作可能な中子を検討した。

#### 2.1.1 中子耐火物の厚み

Fig. 1 に示す二重パイプ構造の中子を考案した。二重パイプ間の充填物として特殊耐火物を用いるがこの厚みが重要な因子となる。すなわち、厚すぎれば中空部への抜熱が不十分となり鋼塊の最終凝固位置が内側に偏在することになり、センタールーズネスにあたる部分が製品表面に露出する危険性がある。

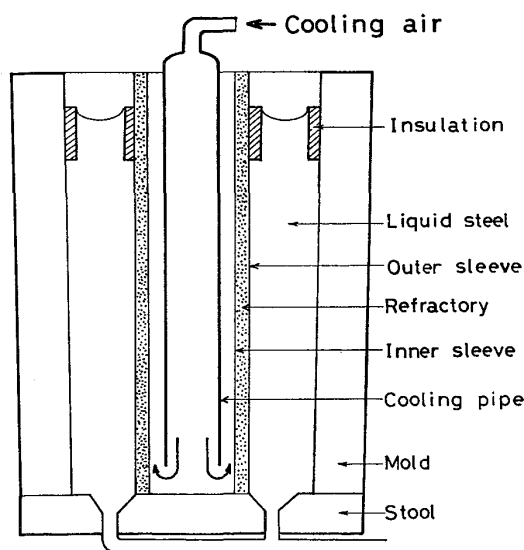


Fig. 1. Figure of hollow ingot.

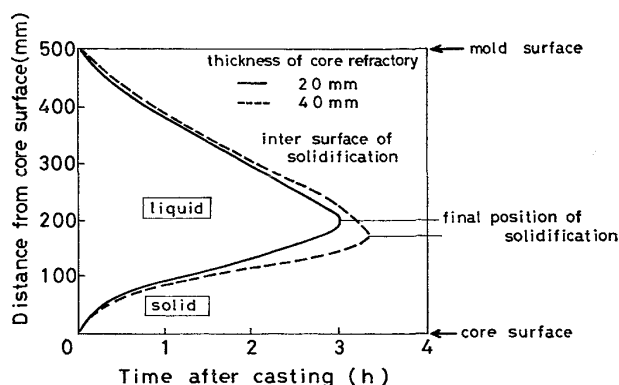


Fig. 2. Relation between solidification pattern and thickness of core refractory of 45t hollow ingot.

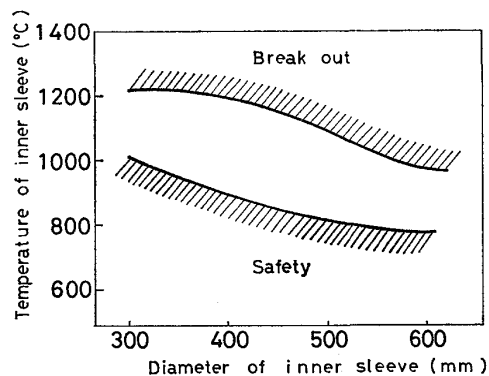


Fig. 3. Condition of inner sleeve.

Fig. 2 に 45 t 中空鋼塊における耐火物厚みと最終凝固位置の関係を計算により求めた結果を示す。厚みが20 mmの場合は注入完了後およそ3 hで凝固を完了し最終凝固位置は中子側から約200 mmにある。一方、40 mmではそれぞれ3.3 h、180 mmとなる。以上のように厚みが2倍となつても最終凝固位置はさほど変わらず、180 mm 内側にあれば表面にセンタールーズネスが露出する懸念はなく、中子の強度を確保するため40 mm厚を採用することにした。

#### 2.1.2 中子の熱間強度

中子は注入中はもちろんのこと凝固が進行している間も十分な強度を保持しないとブレイクアウトの原因となる。Fig. 3 に二重パイプのうち、内側パイプの熱間強度とパイプ径の関係を計算した結果を示す。中子の内径が300 mm から600 mmでは、内側パイプの温度が1000 °Cを超えなければパイプは座屈しない。

Fig. 4 は注入完了からの内側パイプの実測温度変化を計算値と併せ示した。内側パイプの内径が600 mmのとき、1 m/s の速度で空冷すれば注入後2 h程度で温度は600~700 °Cに飽和し、これと図3の結果と考え併せれば中子が座屈する懸念はないことがわかる。

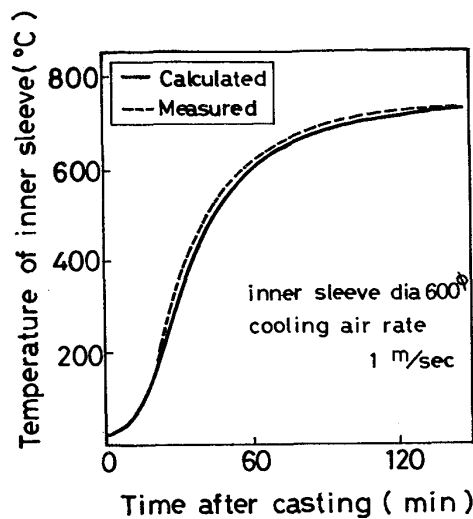


Fig. 4. Change of inner sleeve temperature.

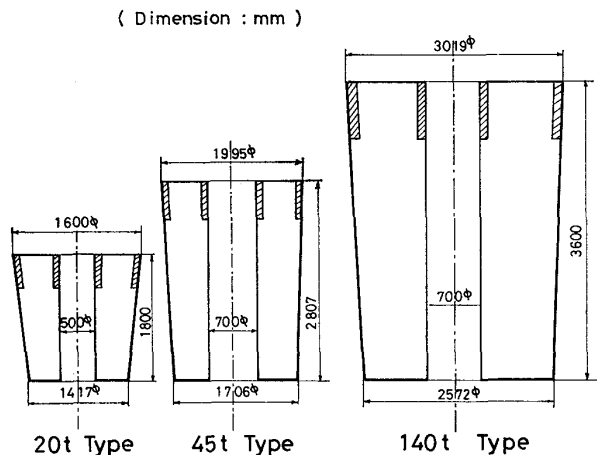


Fig. 5. Dimension of hollow ingot.

以上の検討結果から中子の耐火物厚みを 40 mm、内側パイプの径を 600 mm とし、円筒を 1 m/s で空冷し造塊すれば、45 t 中空鋼塊の場合、最終凝固位置は中子側からおよそ 180 mm となり、また中子も座屈しないので健全な中空鋼塊の製造が可能となることがわかった。

### 2.1.3 製鋼過程における造塊条件

Fig. 1 に示した要領で造塊した。下注法で注入し二重定盤には鋼塊の径に従い湯上り口を 2～3 箇所設けた。既存の鑄型を使用し、押湯は鋼塊の重量調整が可能となるように落とし込みスリーブ方式とし、押湯比(押湯/本体重量×100%)を 20% にした。中子は市販の大径スパイラル鋼管による二重パイプ構造とし、前述の諸条件を満足する諸元となるようにした。パイプ間に充填する耐火物は溶鋼に対し十分な耐火度を持ちかつ鋼塊型抜後容易に降去できるものを選んだ。

20 t、45 t および 140 t 中空鋼塊のプロフィール例を Fig. 5 に示す。中空部の径の最小値は鍛造時の芯金の強

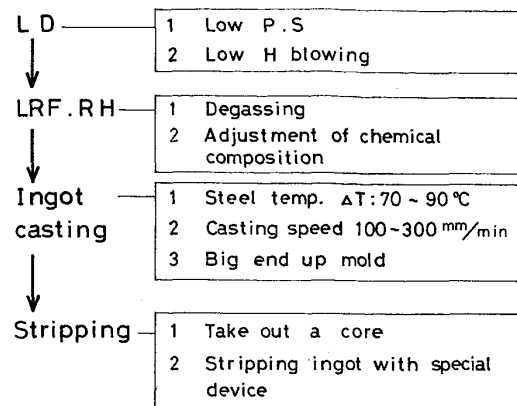


Fig. 6. Steelmaking process of hollow ingot.

度により決定され、20 t、45 t 中空鋼塊でそれぞれ 500 mm、700 mm が必要である。また、鋼塊肉厚は鍛錬比(鋼塊肉厚/製品肉厚)が 2 以上になるように 500 mm 厚とした。以上の条件で決定されたプロフィールの特徴は、縦断面形状でみるかぎり高径比が 3～6 と従来鋼塊に比べ著しく大きい点にある。

次に中空鋼塊の製造プロセスを Fig. 6 に示す。高級鍛鋼が対象となるため転炉では低りん低硫および低水素吹錬を行つた後 LRF または RH 脱ガスで溶鋼を処理し、下注注入する。注入時の取鍋溶鋼温度は過熱度が  $70 \sim 90^\circ\text{C}$  となるようにし、鑄型内湯面上昇速度を 100～300 mm/min とし、高温、低速注入により沈殿晶あるいは表層部の介在物低減を図り、鋼塊の高径比増大による不利を補う。凝固完了後は先に中子の内側パイプを取り外した後鋼塊の型抜きを行う。

## 3. 中空鋼塊の品質

### 3.1 鋼塊の外観

鋼塊の表面は高温、低速注入を行つているので肌は良好である。また中子面は耐火物の付着はほとんどなく、溶鋼に接触したパイプの肌がそのまま残っておりこのまま手入れなしに次工程の加熱、鍛造を行うことが可能である。

### 3.2 鋼塊の内質

Fig. 5 で示した 20 t、45 t および 140 t 中空鋼塊の内質を調査した。中心部の 2 次パイプ、ザク疵などが発生しやすい鋼塊の上半分を鑄み放しのままで調査した。鑄込条件は、Table 1 のとおりであり、20 t 中空鋼塊は普通鋼および 2%Cr-1%Mo 鋼、45 t 中空鋼塊は 5%Cr-0.5%Mo 鋼、140 t 中空鋼塊は SFV3 鋼とし、いずれも压力容器用鍛鋼材を想定した。

#### 3.2.1 偏析

20 t 普通鋼および 2%Cr-1%Mo 鋼の C、S 偏析状況

Table 1. Chemical composition and casting condition.

| Hollow ingot         | Item                                                 |                           |      |      |       |       |      |      |      |
|----------------------|------------------------------------------------------|---------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 20 t<br>carbon steel | Chemical<br>composition (%)                          | C                         | Si   | Mn   | P     | S     |      |      |      |
|                      |                                                      | 0.20                      | 0.29 | 0.96 | 0.014 | 0.012 |      |      |      |
|                      | Casting temp.<br>Casting time<br>Solidification time | 1 590°C<br>7 min<br>4 h   |      |      |       |       |      |      |      |
| 20 t<br>alloy steel  | Chemical<br>composition (%)                          | C                         | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   |      |
|                      |                                                      | 0.08                      | 0.06 | 0.38 | 0.011 | 0.004 | 2.05 | 0.96 |      |
|                      | Casting temp.<br>Casting time<br>Solidification time | 1 595°C<br>9 min<br>4 h   |      |      |       |       |      |      |      |
| 45 t<br>alloy steel  | Chemical<br>composition (%)                          | C                         | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Mo   |      |
|                      |                                                      | 0.12                      | 0.07 | 0.45 | 0.011 | 0.005 | 5.02 | 0.59 |      |
|                      | Casting temp.<br>Casting time<br>Solidification time | 1 595°C<br>14 min<br>5 h  |      |      |       |       |      |      |      |
| 140 t<br>alloy steel | Chemical<br>Composition (%)                          | C                         | Si   | Mn   | P     | S     | Ni   | Cr   | Mo   |
|                      |                                                      | 0.20                      | 0.25 | 1.43 | 0.005 | 0.002 | 0.75 | 0.21 | 0.51 |
|                      | Casting temp.<br>Casting time<br>Solidification time | 1 593°C<br>26 min<br>20 h |      |      |       |       |      |      |      |

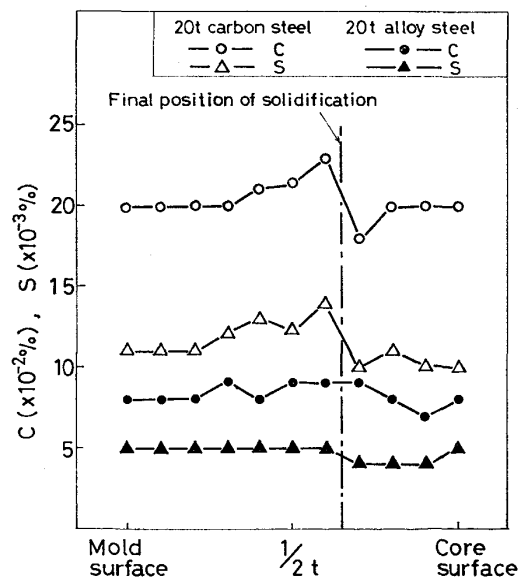


Fig. 7. Segregation pattern of top portion (20t carbon steel, 20t alloy steel)

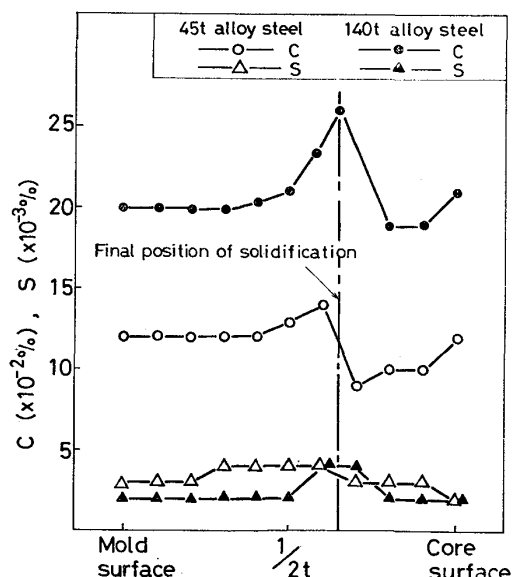


Fig. 8. Segregation pattern of top portion (45t alloy steel, 140t alloy steel).

を Fig. 7 に示す。45 t, 140 t 中空鋼塊について Fig. 8 に示す。いずれも押湯直下にて調査したものである。C 偏析は、押湯直下で 130% 前後である。また内面側では表面直下から最終凝固位置近傍まで偏析率が 90% 前後

の負偏析が発生している。

### 3.2.2 マクロ組織

20 t, 45 t および 140 t のマクロ組織を Photo. 1 に示す。最終凝固位置は、前述の計算どおり全肉厚の 1/3

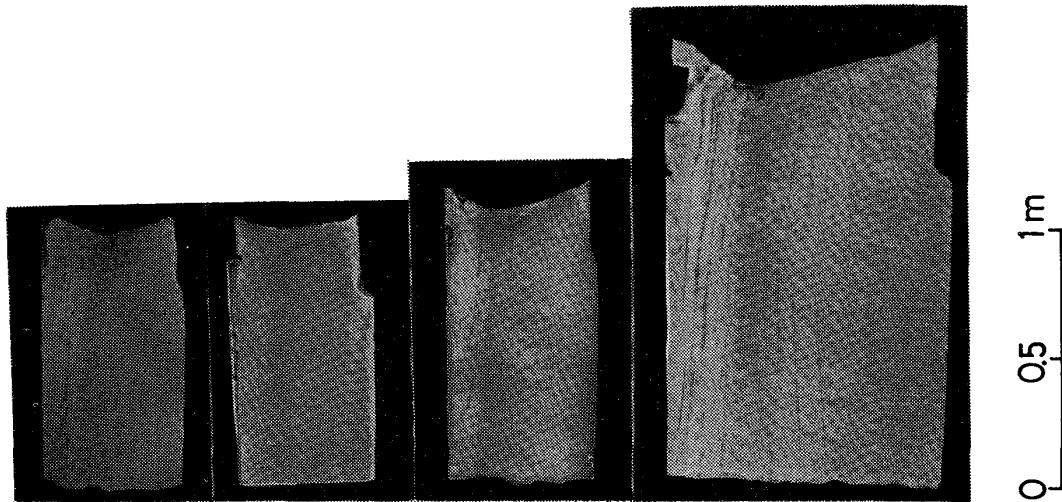


Photo. 1. Macrostructure on longitudinal section of hollow ingots.

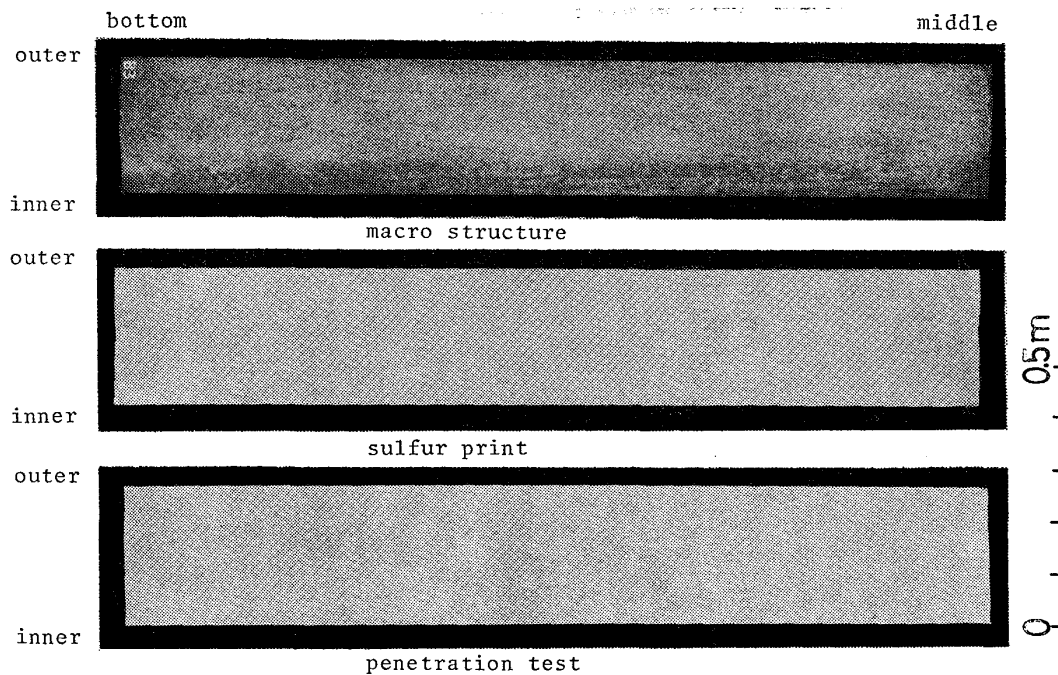


Photo. 2. Macrostructure, sulfur print and penetration test on longitudinal section of a forged product made from a 45t hollow ingot.

～1/4T(肉厚)に相当し、20t 鋼塊では内面から12～14cm、45t 鋼塊は15～18cm、140t 鋼塊は約30cmの位置である。逆V偏析の発生状況は、材質、大きさにより異なつた挙動を示している。すなわち20t 普通鋼は最終凝固位置の両側に発生しているが、20t 2%Cr-1%Mo 鋼は発生していない。また45t 鋼塊では内面側のみ見られ、140t 鋼塊は両側に発生している。

### 3.2.3 ザク

鋼塊内のザクは、最終凝固位置および逆V偏析線上に存在している。これらのザクは、いずれも微小で大きいものでも2mm程度である。

### 3.3 鍛造条件

中空鋼塊における鍛造条件設定のため、各鋼塊の下半分を鍛錬比2～4Mで鍛造し、圧着状況を調査した。UTおよびMTの結果はいずれの場合も無欠陥であり、鍛錬比2Mにて、ザク、マイクロキャビティ等は圧着されていることが確認された。45t 中空鋼塊、鍛錬比2Mの場合のマクロ、サルファー、染色探傷結果をPhoto. 2, Photo. 3に示す。機械試験結果をTable 2に示す。引張特性はL, TおよびR方向とも均一であり、衝撃特性においてはR方向は若干低下しているが、通常鍛鋼品と同程度である。

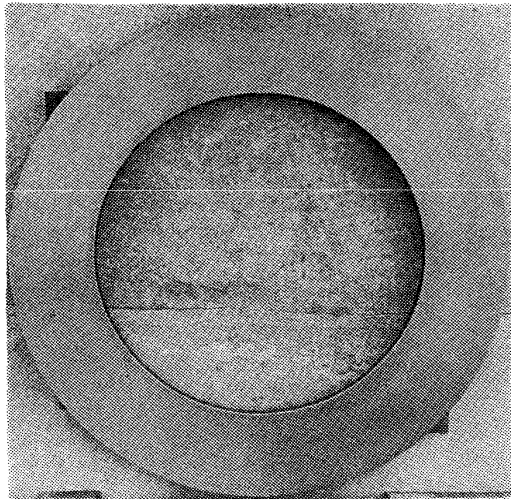


Photo. 3. Macrostructure on cross section at the middle of a forged product made from a 45t hollow ingot.

Table 2. Mechanical properties of 45t hollow ingot.

Material : 5Cr-1/2Mo steel  
 Thickness : 200mm (Forging ratio : 3M)  
 Heat treatment : 930°C×8h A.C-700°C×10hA.C  
 Position : 1/2 t

| Direction | T.S.<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | Y.S.<br>(kgf/mm <sup>2</sup> ) | El.<br>(%) | R.A.<br>(%) | vTrs<br>(°C) |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|------------|-------------|--------------|
| L         | 66.5                           | 51.6                           | 27         | 78          | -69          |
|           | 65.6                           | 51.4                           | 26         | 79          |              |
| T         | 66.4                           | 51.8                           | 26         | 79          | -49          |
|           | 66.2                           | 52.0                           | 28         | 77          |              |
| R         | 65.6                           | 50.6                           | 25         | 65          | -29          |
|           | 65.8                           | 51.4                           | 26         | 67          |              |

つぎに鍛造歩留の設定が必要であり、前述の内質調査材および鍛造実験材より鋼塊の偏析状況を推定した。45 t 中空鋼塊の C 偏析、酸素分析結果を Fig. 9~Fig. 10 に示す。偏析も少なくかつ酸素、清浄度ともすぐれた値であり鍛造歩留として 80% 程度の確保は可能と考えられる。この場合鍛造品は、押湯、湯だまり部および加熱スケールロス等を除いたものである。以上の検討結果から、鍛造条件として、鍛錬比 2 以上および鍛造歩留 80% の設定が可能と考えられる。

### 3.4 製品への適用

中空鋼塊の内質調査、鍛造実験により偏析の少ない、かつ高歩留の鍛造品の製造が可能であることが明らかとなった。鍛造状況を Photo. 4 に示す。中子側のパイプは、鍛造加熱により完全にスケールオフされ、作業性は大幅に向上した。20 t, 45 t, 90 t および 140 t 中空鋼塊より製品を鍛造し、各々の余長からチェック分析を実施した結果を Table 3 に示す。最大偏析はいずれも鋼

Ladle analysis 0.12 %

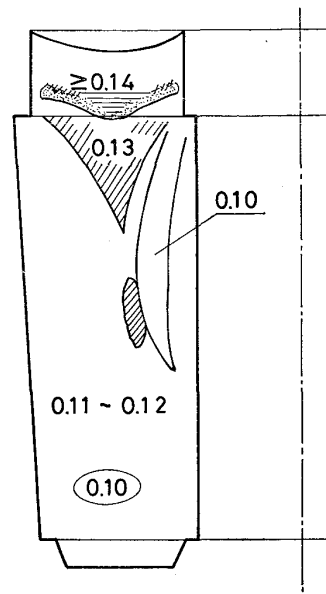


Fig. 9. Distribution of carbon in the 45t hollow ingot.

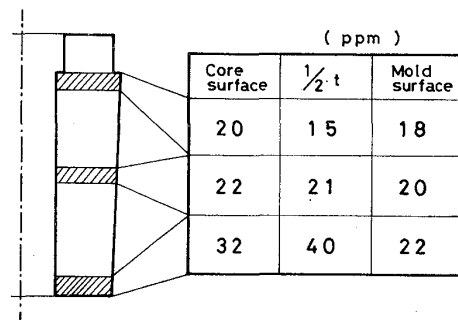


Fig. 10. Distribution of oxygen in the 45t hollow ingot.

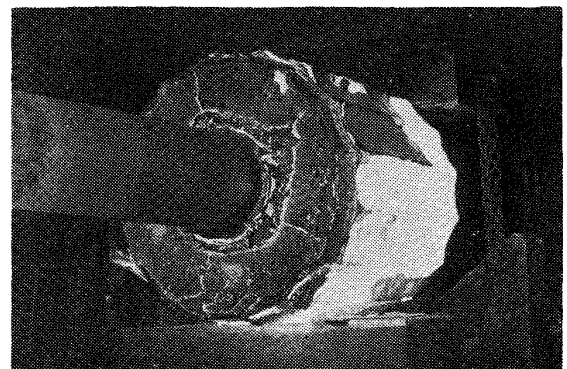


Photo. 4. Forging process of hollow ingot.

塊内質調査の押湯直下の値とほぼ同じである。現在 140 t 鋼塊まで工程化が可能となり、鍛造歩留、作業性は大幅に向上した。

Table 3. Investigation of maximum segregation ratio of carbon for steel forgings.

| Hollow ingot                 | 20 t | 45 t        | 90 t | 140 t          |
|------------------------------|------|-------------|------|----------------|
| Material                     | SF45 | Cr-Mo steel | SF50 | Ni-Cr-Mo steel |
| Frequency                    | 24   | 32          | 4    | 2              |
| Maximum(%) segregation ratio | 121  | 124         | 130  | 130            |

#### 4. 中空鋼塊の凝固特性

##### 4.1 中空鋼塊の特徴

中空鋼塊の内部性状の特徴をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 最終凝固位置が厚さ中心ではなく、内面側に寄っている。
- (2) 逆V偏析線が外面側に比べて内面側に発生しやすい。
- (3) 内面側に負偏析の領域が存在する。
- (4) 最終凝固位置でのザク発生が軽微である。

これらは内面および外面からの凝固速度の差あるいは通常鋼塊との形状の違いに起因するものと考えられるので、凝固計算により中空鋼塊の凝固速度を求めて解析を行った。

##### 4.2 凝固計算の方法

凝固計算は無限円筒を仮定し、差分法により行った。換算温度  $\phi$  (°C)、含熱量  $H$  (kcal/kg) を用いた基礎式を(1)に示す。

$$H_1' = H_1 + \frac{k_d \Delta t}{2 \rho r_1 (\Delta r)^2} \{ (r_1 + r_{1-1}) (\phi_{1-1} - \phi_1) + (r_1 + r_{1+1}) (\phi_{1+1} - \phi_1) \} \dots \dots \dots (1)$$

ここで

$H_1'$  : 時間  $\Delta t$  後の  $i$  点での含熱量 (kcal/kg)

$H_1$  :  $i$  点での含熱量 (kcal/kg)

$k_d$  : 基準熱伝導度 (kcal/m·h·°C)

$\rho$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\Delta t, \Delta r$  : 分割時間 (h), 分割長さ (m)

$r_1$  :  $i$  点の中心からの距離 (m)

$\phi_1$  :  $i$  点の換算温度 (°C)

であり、格子点の番号  $i$  は鋼塊の中心あるいは中子の最内面を基準にとる。

外面点と内面点では表面からの熱流束を  $q_i$  (kcal/m<sup>2</sup>h) として(2), (3)式を用いる。

外面点

$$H_1' = H_1 + \frac{k_d \cdot \Delta t}{\rho \cdot \Delta A_1} \left\{ \frac{r_1 + r_{1-1}}{2 \cdot \Delta r} (\phi_{1-1} - \phi_1) \right.$$

$$\left. - \frac{q_1 \cdot r_1}{k_d} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

内面点

$$H_1' = H_1 + \frac{k_d \cdot \Delta t}{\rho \cdot \Delta A_1} \left\{ - \frac{q_1 \cdot r_1}{k_d} + \frac{r_1 + r_{1+1}}{2 \cdot \Delta r} (\phi_{1+1} - \phi_1) \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $\Delta A_1$  は中心角 1 ラジアン当たりの格子点と中間点の間の分割面積で

外面点

$$\Delta A_1 = \frac{\pi}{2\pi} \left\{ r_1^2 - \left( r_1 - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right\} = \frac{\Delta r}{2} \left( r_1 - \frac{\Delta r}{4} \right)$$

内面点

$$\Delta A_1 = \frac{\pi}{2\pi} \left\{ \left( r_1 + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 - r_1^2 \right\} = \frac{\Delta r}{2} \left( r_1 + \frac{\Delta r}{4} \right)$$

$q_1$  は輻射伝熱の場合(4)式で示される  $q_r$  を用いる。

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon \times 10^8 \left\{ \left( \frac{\theta_1 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_a + 273}{100} \right)^4 \right\} \dots (4)$$

$\sigma$  : ボルツマン定数 (kcal/m<sup>2</sup>h·°K<sup>4</sup>)

$\theta_1, \theta_a$  : 表面および雰囲気温度 (°C)

$\varepsilon$  : 輻射率 (—)

また、中子内面は空気による強制冷却なので強制対流による熱伝達を考慮した。強制対流による熱伝達係数は(5)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} h &= \frac{k}{x} Nu \\ Nu &= 0.0296 Re^{0.8} Pr^{1/3} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

ここで

$Nu$  : ヌッセルト数

$Re$  : レイノルズ数 ( $u x / \nu$ )

$Pr$  : プラントル数 = 0.71

$h$  : 熱伝達係数 (kcal/m<sup>2</sup>·h·°C)

$k$  : 空気の熱伝導率 (kcal/m·h·°C)

$u$  : 空気の流速 (m/h)

$\nu$  : 空気の動粘性係数 (m<sup>2</sup>/h)

$x$  : 流れの方向の座標 (m)

(5)式で得られた熱伝達係数  $h$  を用いて強制対流による熱流束  $q_a$  および全熱流束  $q_1$  は(6)および(7)式で表わされる。

$$q_a = h (\theta_1 - \theta_a) \dots \dots \dots (6)$$

$$q_1 = q_r + q_a \dots \dots \dots (7)$$

鋼塊外表面と鋳型の間は注入直後に空隙が形成されるとし、鋼塊内表面-外筒-耐火物-内筒の各境界は密着していると仮定した。計算に用いた諸数値を Table 4 に示す。

Table 4. Conditions of calculation.

|                                            |                   |
|--------------------------------------------|-------------------|
| Initial melt temperature                   | 1 560°C           |
| Initial others temperature                 | 30°C              |
| Liquidus temperature                       | 1 510°C           |
| Solidus temperature                        | 1 480°C           |
| Thermal conductivity (at room temperature) |                   |
| Steel                                      | 37.1 kcal/m·h°C   |
| Refractory                                 | 0.617 kcal/m·h°C  |
| Air                                        | 0.0234 kcal/m·h°C |

### 4.3 計算結果

45 t 中空鋼塊における中子内面温度の計算値と実測値は Fig. 4 に示したようによく一致している。また、Fig. 3 に示した最終凝固位置(耐火物厚さ×40 mm の場合)は、マクロ観察で見られる最終凝固位置とよく対応しており、この凝固計算は中空鋼塊の凝固特性をよく表している。

140 t 中空鋼塊から製造される円筒状製品を通常鋼塊から製造する場合、鋼塊重量としては 175 t を要する。凝固計算によれば 140 t 中空鋼塊の凝固完了時間は 634 min で、175 t 通常鋼塊の 1 364 min の 1/2 以下である。また、凝固末期の加速凝固の時期を除けば内面側および外面側からの凝固はいずれも 1/2 乗則で表現される。

$$\text{外面側 } d = 26.8\sqrt{t} - 45 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{内面側 } d = 11.2\sqrt{t} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで

$d$  : 凝固厚さ (mm)

$t$  : 時間 (min)

さらに、凝固完了までの 30 min における残存液相の厚さあるいは直径の変化を Fig. 11 に示す。140 t 中空鋼塊では凝固完了 30 min 前で、約 10 cm の厚さの液相が残っていてそれが比較的一様に完全凝固に到る。これに対して 175 t 通常鋼塊の場合は約 20 cm 径の液相が約 10 cm まではば一様に減少するがその後約 1 min で急激に完全凝固する。このような凝固末期における加速凝固の違いが、最終凝固位置におけるザクの発生状況に影響を与えることが明らかである。すなわち、通常鋼塊の場合は著しい加速凝固で凝固を完了し、途中でブリッジングを起こしてザクを形成しやすいのに対して、中空鋼塊ではあまり大きな加速が起こらないのでザクが形成されにくい。このような凝固完了時の加速凝固の違いは、通常鋼塊が断面内で 2 次元凝固をするのに対して中空鋼塊では 1 次元に近い凝固をすることによる。

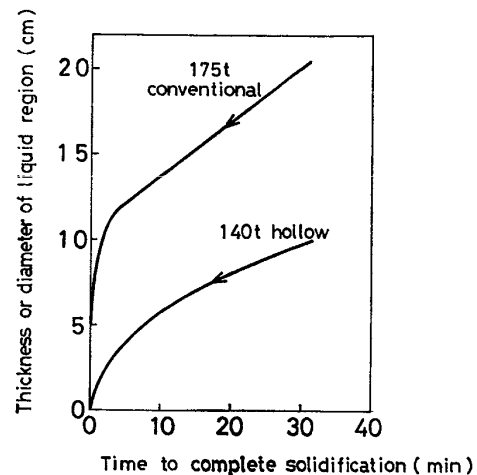


Fig. 11. Decrease of liquid region at the last stage of solidification.

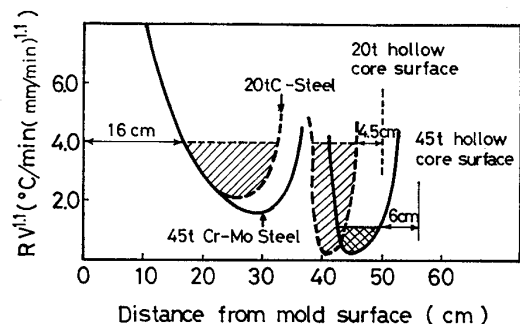


Fig. 12. Region of A-segregation.

## 5. 考 察

### 5.1 逆V偏析線の生成条件

逆V偏析線の生成は凝固速度の影響を強く受ける<sup>1)2)</sup>。鈴木ら<sup>3)</sup>は凝固速度  $V$  (mm/min) と冷却速度  $R$  (°C/min) から逆V偏析線の生成条件を(10)式で示した。

$$RV^{1.1} \leq \alpha \quad \dots\dots\dots (10)$$

鈴木らは 0.7% C 鋼を調査し、 $\alpha = 8.75$  を得ているが、20 t 中空鋼塊の例からも明かなように、 $\alpha$  の値は化学成分によつて変動すると考えられる。

20 t 炭素鋼、および 45 t 合金鋼中空鋼塊の  $RV^{1.1}$  値とマクロ観察で測定した逆V偏析発生領域を対応させて Fig. 12 に示す。20 t 炭素鋼では内面側、外面側ともに  $RV^{1.1} \leq 4.0$  の領域に逆V偏析線が発生している。45 t 合金鋼では内面側の  $RV^{1.1} \leq 1.1$  の領域に発生しているが、外面側ではどの位置でも  $RV^{1.1} > 1.1$  であり、逆V偏析線は発生していない。20 t 合金鋼は内面側、外面側ともに逆V偏析線が認められないが、 $RV^{1.1}$  の最小値は 0.2 なので、この鋼種の  $\alpha$  は 0.2 以下であると推定される。このように逆V偏析線の生成条件を与える  $\alpha$  の値は鋼種によつて異なるが、内面側、外面側の発生領域が同一の  $\alpha$  によつて定められていることから、(10)式の関



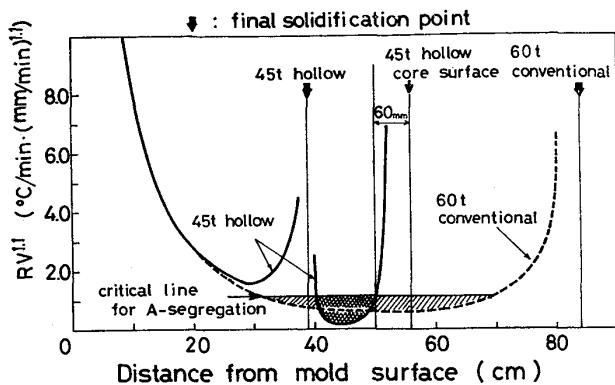


Fig. 13. Region of A-segregation.

係が中空鋼塊においても成り立っていると考えられる。なお  $\alpha$  の値は鈴木らの値も合わせて見ると  $C$  が低いほど、また  $Mo$  が高いほど小さい。 $Mo$  は高橋ら<sup>4)</sup> が示したように重力偏析抑制元素であり、また鈴木ら<sup>5)</sup> が述べているように  $Mo$  を添加するとデンドライト成長速度が大きくなり濃化溶鋼が樹間に捕捉されやすくなるので、逆V偏析の生成条件が  $Mo$  含有量によつて変るものと考えられる。

45 t 中空鋼塊から得られる製品と同一のものを得るためには通常鋼塊では 60 t が必要である。60 t 通常鋼塊と 45 t 中空鋼塊の逆 V 偏析線発生領域の比較を、Fig. 13 に示す。  $RV^{1.1} \leq 1.1$  の条件を 60 t 通常鋼塊に適用すると表層下 35 cm から 70 cm の範囲にわたつて逆 V 偏析線発生の可能性がある。これに対して 45 t 鋼塊では内面側 6 cm から 16 cm が逆 V 偏析発生領域であり、この領域のせまいこともまた中空鋼塊の利点の一つである。

## 5.2 負偏析領域の生成

中空鋼塊の内面側には負偏析領域が存在する。この領域は逆 V 偏析線の発生領域とほぼ対応するので、凝固速度が遅いため濃化溶鋼の移動が起ることが負偏析の成因と推定される。実際の凝固はデンドライト凝固であり、濃化溶鋼のデンドライト樹間への捕捉がマクロ偏析を決定するであろうが、ここでは凝固速度の影響のみを抽出する意味で平面凝固の場合の BURTON の式<sup>6)</sup> を用いて考察する。

実効分配係数を表わす BURTON の式は (11) 式のように与えられている。

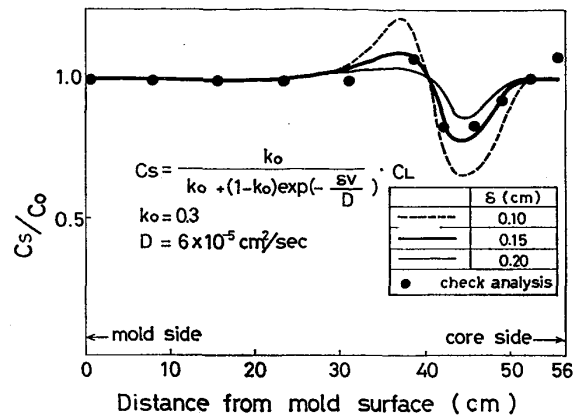
$$k = \frac{C_S}{C_L} = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp(-\delta V/D)} \quad \dots\dots (11)$$

ここで

$C_S$  : 固相濃度 (wt%)

$C_L$  : バルクの液相濃度 (wt%)

$k_0$  : 平衡分配係数 (—)

Fig. 14. Distribution of  $C$  in hollow ingot.

$k$  : 実効分配係数 (—)

$\delta$  : 拡散境界膜厚さ (cm)

$V$  : 凝固速度 (cm/s)

$D$  : 拡散係数 ( $cm^2/sec$ )

凝固率  $g$  からさらに  $\Delta g$  だけ凝固した場合のバルクの液相濃度  $C_L'$  は (12) 式で表される。

$$C_L' = \frac{(1-g)C_L - \Delta g C_S}{(g + \Delta g)} = \frac{1-g - \Delta g \cdot k}{1 - (g + \Delta g)} \cdot C_L \quad \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式を用いて  $g = 0$  から 1 まで逐次計算した結果を Fig. 14 に示す。鋼塊ミドル部の C 分析結果と比較すれば、 $\delta = 0.15$  cm とした場合により一致が見られる。定量的には  $\delta$  の物理的意味が明瞭でなく、また  $\delta$  が全凝固期間にわたつて一定とする根拠もないので必ずしも完全な説明がついているとはいえないが、定性的には内面側の凝固速度が遅いことが負偏析の生成原因であることをこの計算結果は示している。

## 6. 結 言

中子をパイプと特殊耐火物で形成することにより、抜き取りが容易で内面割れのない 140 t の中空鋼塊を製造することに成功した。この中空鋼塊を調査した結果以下のような特徴を有することが明らかとなった。

(1) 最終凝固位置は、内面側より 1/3~1/4 厚みの範囲にある。

(2) 逆 V 偏析線は、外面側よりも内面側に発生しやすく内面側の逆 V 偏析線発生位置では負偏析となつている。

(3) 最終凝固位置でのザク発生は軽微であり、140 t の場合最大 2 mm 程度である。

(4) 偏析率は通常の鋼塊と比較すると、かなり小さい。

さらに中空鋼塊の凝固特性を解析した結果以下のことが

明らかとなった。

(1) 最終凝固位置での加速凝固は、通常の鋼塊のように極端にはおこらない。

(2) 内面側の負偏析領域の発生は、凝固速度が遅くデンドライトによる濃化溶鋼の補足が少ないためである。

(3) 逆V偏析の発生条件は、 $RV^{1.1} \leq \text{常数}$ で与えられ、常数の値は鋼種により異なる。通常鋼塊に比べて中空鋼塊は、この条件を満たす範囲がせまいため、逆V偏析の発生範囲がせまい。

このような特徴を有する中空鋼塊を活用することによ

り、経済的に円筒状鍛鋼品を製造することが可能となった。

#### 文 献

- 1) 田代晃一, 荒木良平, 芳賀千三億, 轟木 透, 大賀栄次: 鉄と鋼, 51(1965), p. 1893
- 2) 成田貴一, 森 隆資: 鉄と鋼, 56(1970), p.1323
- 3) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, 63(1977), p. 53
- 4) 高橋忠義, 工藤昌行: 鉄と鋼, 62(1976), S 455
- 5) 鈴木是明, 宮本剛汎: 鉄と鋼, 62(1976), S 456
- 6) J. A. BURTON, E. D. KOLB, W. P. SLICHTER, and J. D. STRUTHERS: J. Chem. Phys., 21 (1953), p. 1991