

入門講座

鋼の凝固入門-11

各種鑄造法 I: 造塊法

Various Casting Methods I : Ingot Casting Method

梶川耕司
Koji Kajikawa

(株)日本製鋼所 研究開発本部
室蘭研究所 プロセス技術グループ
マネージャー

1 はじめに

連続鑄造化比率が90%を超えている我が国ではあるが、未だ造塊法によって製造されている鋼種も数多く存在する。連続鑄造法は大量生産に適して方法であるが、多品種小ロットには対応しきれないため、要求重量の少ない鋼種は造塊法が適用されている。また鍛造用の大型鋼塊はその大きさから連続鑄造では製造できないため、造塊法で製造されている。世界的に見ても造塊法は各国で実施されており、特に東欧、ロシア、インド、スウェーデンなどでは今でも生産量の10%以上を造塊法で製造している¹⁾。本稿では、現在でも高合金鋼などで重要な技術である造塊法について概説する。

2 普通造塊法

鋼塊の製造法は、大まかに言って上注ぎ法と下注ぎ法に分類される。上注ぎ法は鑄型に直接溶鋼を注入する方法であるが、鑄込み中にスプラッシュが発生して鋼塊肌が悪くなり、鑄込み流に大気巻き込まれ溶鋼清浄度が悪化するといった問題があるため、ラボサイズの小型鋼塊や次節に述べる大型鋼塊を除くと図1に示す下注ぎ造塊法が一般に用いられている。下注ぎ造塊法は鑄型内に溶鋼を注入する際の溶鋼表面の波立ちを押さえることができるという特徴がある。

下注ぎ造塊法は、耐火物製のパイプ(湯道)を介して鑄型底部より溶鋼を注入する方法であり、100ton級以下の鋼塊では一般的な製造法である。下注ぎ造塊法では、鑄込み時の溶鋼の大気酸化を防ぐためにフラックスパウダーが用いられる。フラックスパウダーを用いる powder casting は連続鑄造に先駆けて造塊法のために開発されたものである²⁾。高清浄度が要求される鋼種では、溶鋼注入流の大気酸化も防ぐために不活性ガスシールが用いられる³⁾。下注ぎ法では一つの注入管から湯道を分岐して複数の鋼塊を同時に鑄込むことが広

く行われている。

3 真空造塊法

100ton級の大型鋼塊の製造では、真空造塊法による鋼塊製造が一般に行われている。大型鋼塊製造の難しさとしては、凝固時間が長いために非金属介在物が凝集粗大化しやすいことが挙げられるが、清浄度の高い鋼塊を製造するために耐火物と非接触の状態で酸素を下げられるという特徴をもつ真空造塊法が採用されている(図2)。真空上注ぎ法は鑄込み中にも脱酸・脱ガスが行われるために、下注ぎ法よりも不純物の少ない鋼を作ることが出来る。鑄型径が大きくなると上注ぎでも鑄型壁に付着するスプラッシュが比較的少なくなることから、鑄肌はそれほど悪くはならない。複数の取鍋を一つの鑄型に鑄込むことによって数100ton級の鋼塊が製造可能となっており⁴⁾、現在では図3に示したように670tonまで製造されている⁵⁾。

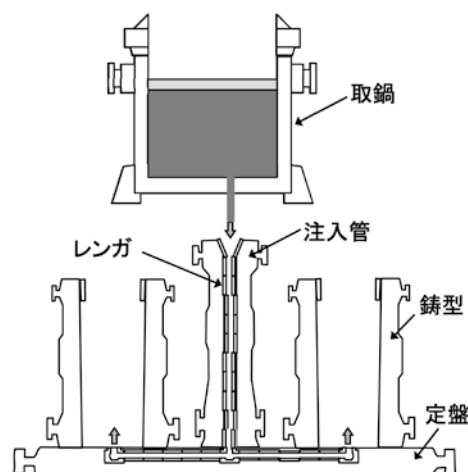


図1 下注ぎ造塊法

4 鋼塊の鋳込み

造塊法では鋼塊は通常鑄鉄製の鑄型に鋳込まれる。鑄型は片状黒鉛鑄鉄、ダクタイル鑄鉄などが一般に用いられている。鑄型に注入する際の溶鋼温度、鋳込み速度、鋳込み雰囲気、鑄型の形状や内面性状などはすべて鋼塊の品質に影響する。

鑄型内の湯面が静かに上昇するほうが良好な鑄肌が得られるため、鑄肌に関する限り鋳込み速度は遅い方が有利である。しかし、鋳込み速度を減少すると鑄型壁側の凝固層が発達しやすくなり、連続鑄造でみられるようなりップルマーク（湯じわ）が生じてしまうこともある。また、鋳込み流の脈動が起きると二枚皮とよばれる欠陥が生じることがあるため、鋳込みは変動の少ない一定の速度で鋳込むことが基本である。

鋳込み速度は遅すぎると鋳込み中に溶鋼温度が低下してしまうため、鑄型内に適正温度の溶鋼を注入するという観点からは鋳込み速度は早いほうが望ましい。しかし鋳込み速度が速すぎると溶鋼表面の波打ちが激しくなり、平滑な鑄型表面性状の確保という点から問題となる。特に後述する下注ぎ造

塊法では湯面中央が高く盛り上がってしまうため、表面を被覆している酸化防止剤から溶鋼が大气に露出してしまふ。また急激な鋳込みを行うと鋼塊縦方向の収縮が一気に起きるので、割れの原因となることがある。

鋼塊表面の割れは、鑄型内部の表面性状に起因する凝固組織の不均一が起こす割れと凝固収縮によってエアギャップができた際に溶鋼静圧で凝固層が引き裂かれるために生じる割れ、鑄型の拘束があるために凝固収縮によって凝固層が裂ける割れ、などに大別できる。凝固収縮で生じる割れの対策として、鑄型内面にコルゲートもしくはフルートと呼ばれるひだ状の起伏を設けることが古くからおこなわれている^{6,7)}。図4にコルゲート付鋼塊の模式図を示す。

鋼塊凝固層の成長速度は、凝固のごく初期と凝固末期を除けば溶鋼が持つスーパーヒートと凝固開始からの時間を用いたLightfootの凝固式⁸⁾を過熱の影響を補正した以下の式⁹⁾で推測できることが知られている。

$$D=k\sqrt{t}C$$

ここでDは凝固層の厚さ、tは凝固開始からの時間、kは定数、そしてCは鋼のスーパーヒートに依存する定数である。しかし実際には凝固末期には残液相が少なくなり凝固が3次的に加速的に進行する加速凝固と呼ばれる現象が起きるため、凝固式だけでは凝固完了時間を推定することは困難であり、現在では凝固過程を推測するのにコンピューターシミュレーションが広く活用されている。図5に最新の凝固シミュレーションによる計算結果の例を示す¹⁰⁾。

鑄型に鋳込まれた溶鋼は、鑄型壁でチル晶と呼ばれる微細な等軸晶を生じたのち、凝固組織は柱状晶に遷移して成長する。その後、凝固前面の温度勾配が緩くなって再び等軸晶となるが、ある程度指向性を持った分岐柱状晶と呼ばれる組織となる。図6に鋼塊内部組織の模式図を示す。軸心部は等軸晶となり、凝固収縮に伴って引け巣が生じる。

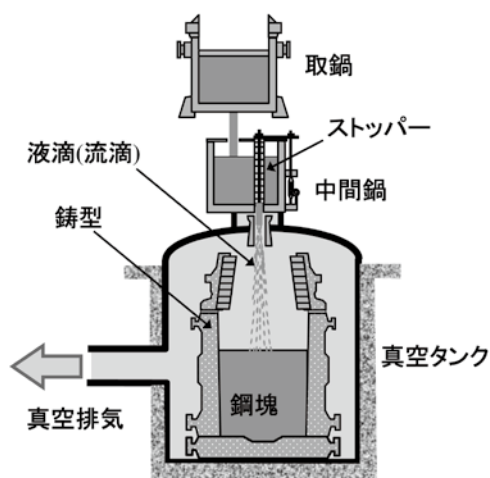


図2 真空造塊法



図3 世界最大の670ton鋼塊



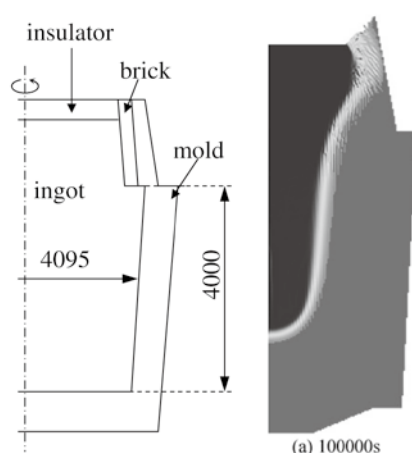
図4 コルゲート付鋼塊

5 鋼塊に付随する欠陥

鋼塊の欠陥としては、引け巣系欠陥、ブローホール、マクロ偏析、割れ、非金属介在物欠陥などがある。

・引け巣系欠陥

凝固収縮に伴う引け巣には、パイプ、ザク、マイクロポロシティなどがある。鋼塊外部につながる引けを1次パイプ（外引け）、押湯表面の凝固殻の下に生成した内在している引け巣を2次パイプと分けて呼ぶこともある。どちらも凝固完了まで十分な押湯が効かなかったために生じる引け巣である。大型の鋼塊では鋼塊中心部に一般にザクと呼ばれている引け巣が生じる。ザクはデンドライト樹間に空隙が出来るタイプの引け巣のことを言う。ザクの生成予測方法には、温度勾配法^{11,12)}やL/D法¹³⁾などがあるが、凝固末期に押湯からの給湯が不十分になる時を推測してザク発生の予測を行う方法が採



凝固過程での固相率変化¹⁰⁾

図5 凝固シミュレーションの例

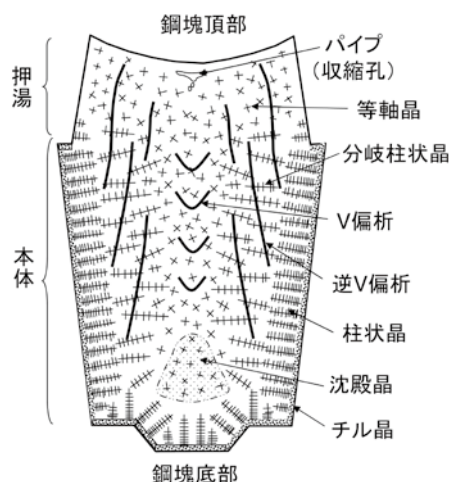


図6 鋼塊各部の組織

られている。圧延に比べて鍛圧比が少なく、空隙系欠陥が残存しやすい自由鍛造用の鋼塊では、押湯からの給湯性を良くするために上広がりテーパを設けた鑄型が用いられる。

凝固収縮に伴うパイプの生成を防ぐために鋼塊の頂部に押湯を設けるのが通常である。押湯の表面は凝固核の生成を防ぐために発熱性の保温剤や断熱保温材が載せられる。押湯は凝固収縮部に溶鋼を補填するに十分な体積を有し、凝固末期まで内部が液相であることが必要とされる。押湯表面の保温は、発熱保温剤、断熱保温材を用いる以外にESHT（エレクトロスラグホットトップ）法という方法もある。これは通常の造塊法で鑄込みを行った後に、電極加熱で押湯保温を行う方法である。消耗式電極を用いることで、鋼塊軸心部の成分濃化を抑えることができるという特徴がある。

・ブローホール

溶鋼中にガス成分が多く溶存しているとブローホールと呼ばれるガス気泡による空隙欠陥が生成する。図7に鋼塊に生成したブローホールの例を示す。ブローホールの発生は、溶鋼静圧とガス元素の分圧との差で理解されている。ブローホールは溶鋼のガス成分濃度が以下の条件を満たしたときに生成する¹⁴⁾。

$$P_{H_2} + P_{N_2} + P_{CO} > P_s + P_t + 2\sigma/r$$

ここで P_{H_2} は溶鋼中水素濃度と平衡する水素分圧、 P_{N_2} は窒素濃度と平衡する窒素分圧、 P_{CO} は溶鋼中炭素、酸素濃度と平衡するCO分圧、 P_s は溶鋼表面にかかる雰囲気圧力、 P_t は溶鋼静圧、および σ は半径 r の気泡に接する溶鋼の表面張力である。実際の鋼塊で凝固の進行とともに固液分配によって溶鋼中の溶質成分が濃化するので、ブローホール抑制を考える場合には偏析を考えなければならない。また鉄鋼材料は固液共存領域で δ/γ 変態をするものがあるため、各相におけ

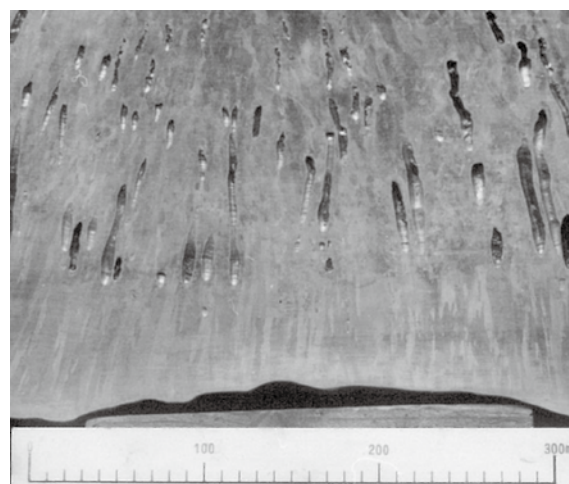


図7 ブローホールの例

る平衡ガス分圧を考慮する必要がある¹⁵⁾。

・マクロ偏析

鋼塊サイズが大きくなると内部には不可避免的にマクロ偏析が生成する。マクロ偏析によって局所的に成分濃化が生じると製品の機械的性質の低下が生じて問題となる。特に偏析部で析出物が生じる場合には注意が必要である。マクロ偏析を軽減するには、鋼塊サイズを小さくする、偏析が起こりにくい成分に変更する¹⁶⁾、もしくは以降に述べる2次溶解プロセスを採用する、などで対応するしかない。逆V偏析と呼ばれるマクロ偏析は、母液相と溶質分配によって生じた濃化液相との液相密度差によって生じることが知られている。マクロ偏析の生成予測法には、経験式によるもの¹⁷⁾、Rayleigh数によるもの¹⁸⁾などがある。軸心部には凝固収縮に伴う濃化液相の流動によってV偏析とよばれるマクロ偏析が生じる。

・割れ

鋼塊の割れには、先に述べた表面の割れ以外に、熱間割れ、熱応力割れ、変態応力割れ、ゴーストクラックなどがある。熱間割れはホットティアとも呼ばれ、凝固シェルの強度が十分でないときに凝固殻が一部拘束されたことによって凝固収縮応力によって凝固シェルが裂ける現象である。鋼塊の凹部など凝固が周囲よりも遅れる場所で拘束が起きた時に生じやすい。熱応力割れは文字通り熱応力による割れで、急冷されたときに起こりやすい。割れ感受性が高い材料を製造する際には熱扱いを適正にする必要がある。変態応力割れは相変態による体積変化によって生じる割れである。これも適切な熱扱いにより防ぐことができる。ゴーストクラックは鋼塊中の溶存水素による割れである。これを防ぐには casting 前に十分水素を低減しておくことが重要である。

・非金属介在物欠陥

鋼塊製造上の品質問題として非金属介在物がある。 casting 前の溶鋼の清浄度だけではなく、 casting 時の2次酸化、スラグ・フラックスの巻き込み、および浮上分離条件などで清浄度は大きく変わってくる¹⁹⁾。 casting 時の2次酸化を防ぐためには casting 流が大気へ暴露しないように不活性ガス雰囲気とすることが行われている。また casting 速度が速すぎると前述のようにフラックスパウダーで被覆した湯面中心部が盛り上がる現象が生じ、その部位の被覆が破れて大気酸化してしまう。特に casting 初期にこの現象が起こりやすいので、これを防ぐためにノズル先端形状が各社で工夫がされている。また casting 速度に脈動が生じるとスラグ・フラックスの巻き込みが生じやすくなるので、 casting 速度は一定であることが必要である。

金型鋼塊では、沈殿晶と一般に呼ばれている遊離結晶の沈降 (シャワリング、Crystal rain) に伴った鋼塊のBottom側に等軸晶の沈殿が生じる。この沈殿晶部は負偏析となること

が知られている。鋼塊の品質において沈殿晶が取り上げられるのは、この部位が非金属介在物欠陥の発生頻度が高い部位であるためである。非金属介在物は溶鋼との密度差によって浮上分離されるが、遊離結晶に捕捉された非金属介在物は、見かけの比重が溶鋼よりも重くなるために浮上分離できなくなる。 casting 温度が低すぎると遊離結晶が大量に発生して非金属欠陥を引き起こすことがある。

6 二次溶解法

二次溶解法とは、電気炉、真空誘導溶解炉等で溶製した母材を再溶解して水冷モールド中で積層凝固させる造塊法である。高純度が要求される材料や偏析を起こしやすく普通造塊法では製造が困難な材料の製造に使用されている。二次溶解法には、エレクトロスラグ再溶解法 (ESR)、真空アーク再溶解法 (VAR)、プラズマアーク再溶解法 (PAR)、電子ビーム再溶解法 (EBR) などがある²⁰⁾。 PARとEBRは、介在物の浮上分離を目的として水冷銅ハースを併用したプラズマアークコールドハース再溶解法 (PACHR)、電子ビームコールドハース再溶解法 (EBCHR) として用いられることが多い。ここでは高級鋼製造に広く使われている ESR²¹⁾ と VAR (図8) について概説する。

・ESR

目的とする材料を消耗電極として、これをスラグに通電して生じるジュール熱によって溶解し、水冷モールド内で逐次凝固させていくプロセスである。電極先端で溶解された材料がスラグと介することで精錬反応が進行する。元々は溶接技術の一つであったが、ソ連のパトン研究所において現在の鋼塊製造技術の形に発展した。 ESRにはCaF₂量の多い高塩基度スラグを用いるので高い脱硫能を持っている。水冷モールド

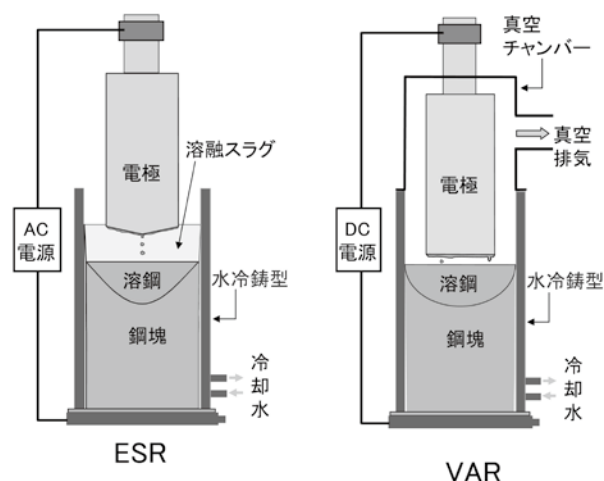


図8 ESRとVARの模式図

ド内で底部側から逐次凝固が進行するので、指向性の凝固組織を持っており空隙系欠陥は皆無に近く、また凝固速度が速いためマクロ偏析も生じにくいという特徴がある。ESRの凝固組織の例を図9に示す。底部から指向性凝固していることがわかる。モールドは円筒型のみではなく、圧延用の矩形形状のものも使われている。

・VAR

ESRと同じように目的とする材料と消耗電極とする2次溶解法であるが、VARはスラグのジュール熱の代わりに、アーク熱を用いて電極を溶解する方法である。アークを発生させるために真空下で溶解を行うが、真空中での溶解となるため高い脱ガス能を有するプロセスである。以前は電極の位置制御が難しいためにESRよりも偏析が起こりやすいと言われたこともあったが、制御方法の確立した今では溶湯プールの上にスラグのような熱溜めのないVARの方が速い凝固速度を得ることができるため、VARはESRよりも偏析を抑制することができるとされている。

7 おわりに

連続鑄造法の発達した今では、造塊法は過去のプロセスとみられる方もおられるかもしれないが、まだまだ現役の主要プロセスの一つである。小ロット生産のもの、中心偏析が問題となるもの、連続鑄造で製造できないサイズのものは必然的に造塊法による製造となる。鉄鋼協会の講演大会ではほとんど発表されなくなってしまった鋼塊製造技術であるが、2012年に鋼塊製造に主眼を置いたICRF (Ingot Casting, Rolling and Forging) という国際会議がドイツで企画され、2014年に第2回目の会議がイタリアで開催されている。造塊法はまだ改善の余地は大いにあるプロセスであり、今でも研究開発が進められている。



図9 ESR鋼塊のマクロ組織の例

参考文献

- 1) Stahlinstitut VDEh and Wirtschaftsvereinigung Stahl 編：Jahrbuch Stahl 2012, Verlag Stahleisen GmbH, Germany, (2012)
- 2) 佐藤良吉：日本金属学会誌, 12 (1973) , 391.
- 3) R.Schlatter：Steel Times, (1986) , 432.
- 4) 竹之内朋夫：日本製鋼所技報, 46, (1992) , 108.
- 5) T.Yamauchi, K.Hidenao, Y.Kishi, S.Ueda, H.Yoshida and K.Kimura：Proc.the Seventh Inter.Conf.Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants, (2013)
- 6) A.W.Brearley and H.Brearly：Ingot and Ingot Mould, Longmans, Green and Co., (1918)
- 7) E.Gathmann：The ingot phase of steel production, 2nd ed., Schneidereith & Sons, Baltimore MD, U.S.A., (1942)
- 8) N.M.H.Lightfoot：J.Iron Steel Inst., 119 (1929) , 364.
- 9) J.Chipman and C.R.Fondersmith：Trans.AIME, 125 (1937) , 370.
- 10) T.Sawada and K.Kajikawa：Proc.2013 Int. Symposium on Liquid Metal Processing & Casting, TMS, Austin TX, U.S.A., (2013) , 165.
- 11) 新山英輔, 内田敏夫, 森川穰, 齊藤茂樹：鑄物, 52 (1980) , 635.
- 12) 八百升, 加藤敏雄, 難波明彦, 野口英臣, 中西恭二, 石井正武：鉄と鋼, 69 (1983) , S1021.
- 13) 山田人久, 桜井隆, 竹之内朋夫, 岩波義幸：鉄と鋼, 73 (1987) , 1706.
- 14) E.T.Turkdogan：Proc.6th process technol.conf., (1986) , 767.
- 15) 高橋 史生, 百井 義和, 梶川 耕司, 山田 人久：鉄と鋼, 96 (2010) , 107.
- 16) 鈴木是明, 谷口晃造：鉄と鋼, 65 (1979) , 1581.
- 17) 鈴木是明, 宮本剛汎：鉄と鋼, 63 (1977) , 53.
- 18) P.Auburtin, T.Wang, S.L.Cockroft and A.Mitchell：Metall.Mater.Trans.B, 31B (2000) , 801.
- 19) L.Zhang and B.G.Thomas：Metall, Mater.Trans.B, 37B (2006) , 733.
- 20) 笹山新一：第143・144回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1992) , 221.
- 21) G.Hoyle：Electroslag Processes：Applied Science Publishers, London and New York, (1983)

(2014年6月5日受付)