

ホットトップ鑄造におけるホロー形成用冷却水循環式中子の開発

Cooling-Water Circulation Core for Casting Hollow Ingots

一木 隆彦*
Takahiko Ichiki

宮本 克見*
Katsumi Miyamoto

加藤 和美*
Kazumi Katou

概要 今回、押出管製造のために供給するホローインゴットをホットトップ鑄造法にて鑄造するときに、表面が滑らかで内部品質的にも優れたホロー部分を形成することができる画期的な中子を開発した。

この中子を使用することにより、ホロー内面の表面性状とその近傍の鑄塊組織が著しく改善され、押出工程に供給する前に行われる内面切削工程での切削量が削減されることで歩留りと切削能力の向上が可能となった。

この論文は、これまで実施あるいは実施が検討されたホロー鑄造技術の特徴と問題点、そして今回開発された中子の構造の特徴と、この中子を利用した鑄造の結果を記している。またより良いホロー内面性状を安全に製造するために、中子の構造や鑄造条件についての考察を行っている。

1. はじめに

マンドレル押出管を製造するにあたり、管の偏肉防止の点から、使用されるピレットはホロー（中空）材とするのが適当である。ホローピレットは、まずホローインゴットを鑄造し、その後ホロー内面の切削仕上げを行うことで製造されている。

製造コストを削減するためには、内面切削工程における能力及び歩留りの向上が必要である。能力向上には切削速度の向上が、また歩留り向上には切削代の削減が最も効果的である。その際問題となるのは、ホローインゴット内面鑄肌性状・鑄塊組織状態により一定の切削代を設けざるを得ないことである。

今回我々はこれらの問題を解決するべく、インゴットのホロー一部を形成するための中子の抜本的な構造変更を試みた。現在、ホロー一部を形成するための中子は金属製で筒状となっており、その内部には冷却水が引き込まれ、冷却水はそのまま形成されたホロー内面に直接噴射される。ホットトップ式鑄造法においても同様である。そして過去にも同様の目的で冷却水を用いない黒鉛中子やホットトップ方式直接水冷中子が試された経緯はあるが、前者では内面冷却が不安定、後者では過冷却となり内面性状が安定せず実用化には至らなかった。

これらの結果を踏まえ、中子に引き込んだ冷却水を直接ホロー内面に噴射させる方式に替えて、ホロー内面への冷却水の直接噴射を行わずに中子内を循環させたあと、外部に排出する方法を考案した。

そして、この方法による鑄造が可能であり、ホロー内面性状は向上し、内面近傍の鑄塊組織が改善され、それにより内面切削代を削減することができた。

2. ホロー鑄造技術について

ホロー鑄造技術についての概略及び問題点について説明する。（図1～4）

フロート鑄造方式によるホロー鑄造の概略図を図1に示す。フロート鑄造方式においてはスパウトやフロートにて生成する酸化物の混入が防止できないことや、また溶湯の供給が困難になる等の問題がある。¹⁾

図2には現状のホットトップ式鑄造におけるホロー鑄造の概略図を示す。溶湯が水平に供給されるためフロート鑄造方式の欠点を回避できるのはソリッド鑄塊と同じである。しかしアルミ合金製の水冷中子が鑄型内を貫通する構造であるため、相対的にホロー部のズンプが深くなり、凝固殻の再溶解現象による溶け落ちが生じる。これが最大の問題点である（図5）。ホロー内面性状を悪化させている要因は主としてこの再溶解によるものである。²⁾

またホットトップ式鑄造において中子本体をホットトップ式としたホロー鑄造の概略図を図3に示す。これはアルミ合金製水冷中子と耐火物を組み合わせた中子である。水冷部分が短いため溶け落ちが生じにくく、また上部耐火物により溶湯レベル変動の影響を受けない利点がある。

しかし一方で、水による抜熱量が多くなり、凝固開始位置が潤滑のない耐火物部まで上昇して凝固殻が破壊され、溶湯漏れが生じ安全上も危険なことから実用化はされていない。²⁾

* 軽金属カンパニー 小管棒工場 生産技術グループ

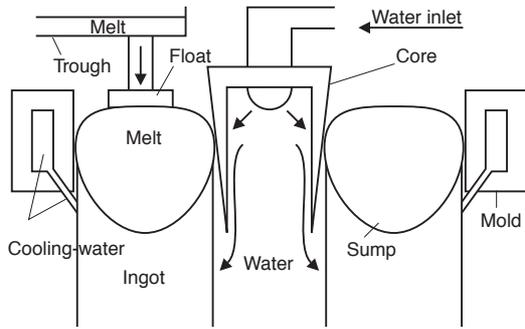


図 1 フロート casting 方式におけるホロー casting 概略図
Float casting (Conventional model)

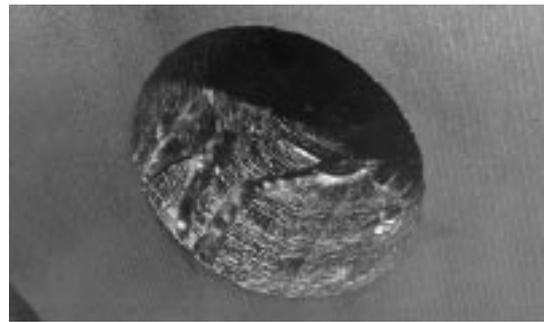


図 5 ホロー内面に生じた再溶解からの溶け落ち現象
Liquation from remelting

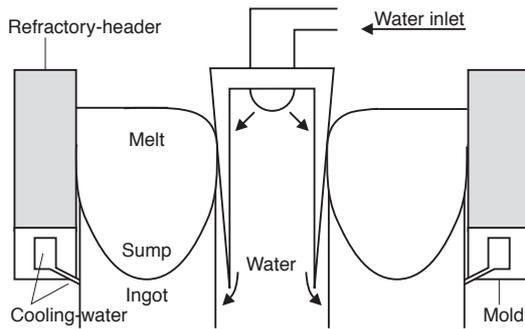


図 2 ホットトップ casting においてアルミ合金製中子を使用したホロー casting 概略図
Hot top casting with aluminum-alloy core (Sectioned model)

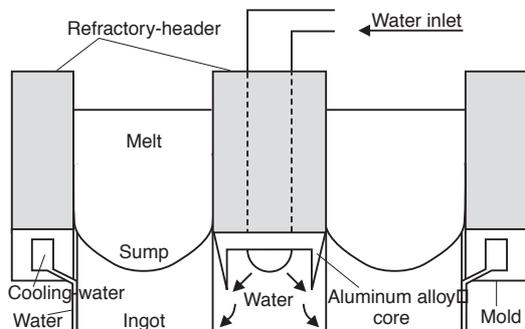


図 3 ホットトップ構造を応用した中子を使つてのホロー casting 概略図
Hot top casting with aluminum-alloy core and refractory header (Sectioned model)

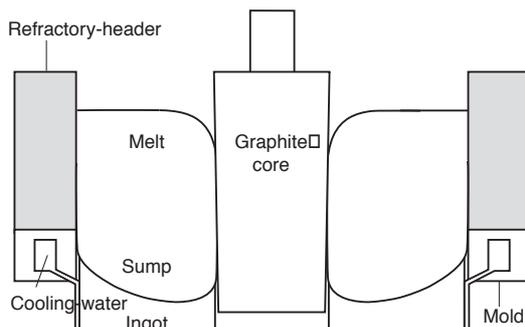


図 4 黒鉛製中子を使用したホットトップ casting におけるホロー casting 概略図
Hot top casting with graphite core (Sectioned model)

図 4 には黒鉛製中子を用いたホットトップ式ホロー casting の概略図を示す。これは外周部からの凝固進行に対して、その最終部が黒鉛部先端により拘束されてホロー部分を形成させるものである。黒鉛の自己潤滑性を利用し、かつ特別な冷却を行わないことが特徴で、内面は非常に平滑である。²⁾しかしながら黒鉛が溶湯に浸食されること、また黒鉛の熱伝動性が大きいことからホロー内面性状の平滑性が維持できず、実用化には至っていない。

3. 冷却水循環式中子について

前述されたそれぞれの中子の長所を生かし短所をカバーするには、

- (1) ホットトップ casting であること
- (2) ホロー内面凝固開始を下方の位置で安定させること
- (3) ホロー形成部分が適度に冷却がされることを満たす必要がある。

そしてこれを満たすべく考案されたのが、冷却水を循環させる方式の中子を用いた casting 法である。冷却水循環式の中子の概略図を図 6 に示す。主な特徴として以下の項目が挙げられる。

- (1) 中子の上半部分が耐火物で、下半部分がアルミ合金の 2 部分から構成されている。(ホロー内面再溶解の緩和が目的。)
- (2) 中子のアルミ合金部は外周部モールドより下方に配置され、かつその内部を循環する冷却水のみで冷却されるため、ホロー内面部分は外周部より遅れて形成される。(目的はホロー内面の再溶解の緩和と、中子側の冷却能を緩和させて耐火物部での凝固を防止することである。)
- (3) ホットトップ casting 法であるため、湯の乱れによる酸化物の混入や粗大晶生成が起きにくい。
- (4) ホロー内面側も潤滑油の連続供給が行えるよう、外周部 casting と同じ構造にした。
- (5) 冷却水の導入管と排出管が同心になるようにし、できる限り中子内の水流が均一になるようにした。
- (6) ホロー内面に冷却水を直接吐出しないため、ホロー内面側から溶湯が漏れた場合に、溶湯が冷却水に覆いかぶさり、冷却水が気化することによって生じる水蒸気爆発の危険がなく、安全性の面で非常に優位である。

目的はこの中子を利用して、ホロー内面性状を向上させること及びホロー内面セル層を薄くすることにより、ホローインゴットの内径を拡大させ、切削代を削減することと切削速度を向上させることである。今回目標値を以下のとおりを設定した。

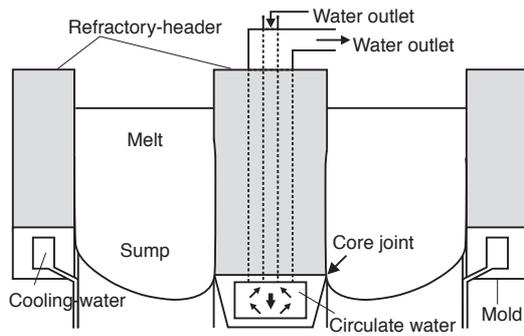


図6 冷却水循環式中子の概略図
Schematics of water-circulation core

- 目標: ・ホローインゴット内径: 190 mm (穴開上り 200 mm)
(現状: ホローインゴット内径: 175 mm)
- ・切削速度向上: 現状比 50 % 以上

4. 冷却水循環式中子を利用するの鑄造

4.1 冷却水循環式中子を用いての鑄造, 及び鑄塊内部組織

過去に検討された中子の鑄造結果を参考にして, 中子境界位置を外周部モールド上端から 60 mm 下方とし, また中子のテーパ角度を θ , 降下速度を 45 mm/min とした。その他溶湯温度・冷却水量等の条件は従来のとおりとして 3003 材の鑄造を行った。

結果, 鑄造開始時の湯漏れや, 凝固収縮により降下不能となる状況は発生せず, この構造での鑄造が可能であることが確認できた。またホロー内面の状態は細かいリップルが並び非常に良好であり, 著しい改善がなされた (図7)。鑄塊径は 190 mm であった。

内部組織は, ホロー内面セル層が約 3 mm の厚さで全周安定しており, それより内部においては粗大晶もなく非常に良好であった。これにより内面切削代の削減が可能となった (図8)。

4.2 内面切削の実施

ホローインゴット内径を目標どおり 190 mm にできたことで切削量が削減され, 切削速度を 53 % 向上させることができた。(3003 材)

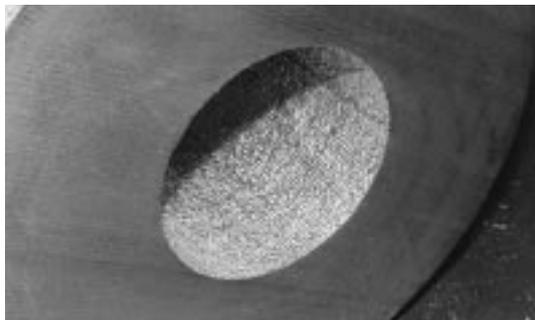
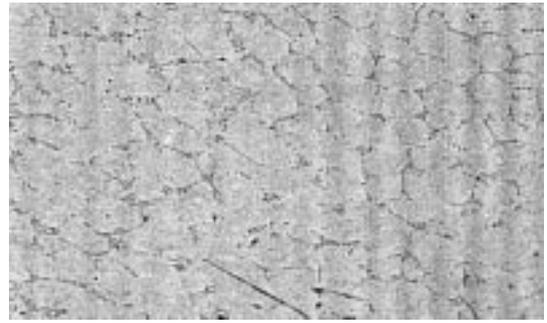
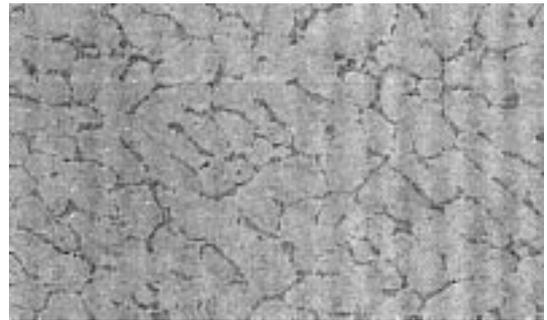


図7 冷却水循環式中子を用いて鑄造したインゴットのホロー内面性状 (中子のアルミ合金部と耐火物部の境界位置が, 外周部モールド上端から 60 mm 下方, 中子テーパ角 θ , 降下速度 45 mm/min の場合)
Inner surface smoothness of a 3003 ingot, with water-circulation core, 60 mm in core joint to outer mold, in core taper angle and 45 mm/min in casting rate



(1) ホロー内面より 2 mm (冷却水循環式中子使用)



(2) ホロー内面より 4 mm (冷却水循環式中子使用)



(3) ホロー内面より 5 mm (直接水冷式中子使用)



(4) ホロー内面より 10 mm (直接水冷式中子使用)

図8 冷却水循環式中子を用いて鑄造したインゴットのホロー内面近傍マイクロ組織
Inner-surface microstructures of (1),(2): Water-circulation core, and (3),(4): Hot-top casting with Al-alloy core

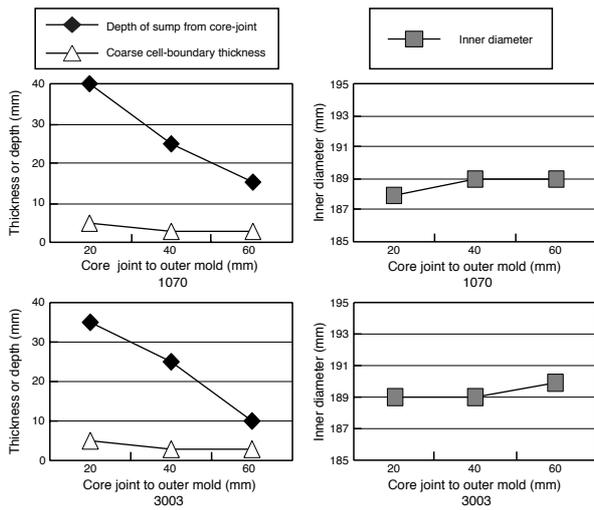


図9-1 中子境界部分の位置とホロー内面セル層の厚さ、内径及び铸造中ズンプ深さの関係 (1070, 3003)
Coarse cell-boundary thickness, sump depth or inner diameter vs. core-joint level (1070, 3003)

4.3 他材質 (1070, 5052, 5056, 6063, 6061 合金) での铸造確認

1070, 5052, 5056, 6063, 6061 材を冷却水循環式中子を用いて铸造したが, 3003 と同様, 铸造初期のトラブルも生ぜず, 铸造が可能であることが確認できた。

4.4 中子境界位置, テーパー角度, 及び铸造降下速度がホロー内面性状に及ぼす影響

4.4.1 中子境界位置の影響

1070, 5052, 5056, 6063, 6061 の各合金にて, 中子境界部分が外周部モールド上端から 20 mm 下, 40 mm 下, 60 mm 下に来よう設定して铸造を行い, 各々の設定条件におけるホロー内面性状を比較した。性状比較のためのパラメータとしてホロー内面セル層の厚さを選定した。またホロー部内径及び中子境界部からのズンプの深さを測定した。なお, 中子のテーパー角度は θ , 降下速度は 45 mm/min としてすべての铸造を行った。

中子境界位置の, それぞれの測定項目に対する影響度を表したグラフを図9に示す。これより, どの合金種においても, 中子境界位置が外周部モールドに対して下方に来るほど再溶解の程度は小さくなり, ホロー内面性状は改善され, セル層の厚さが小さくなることわかる。一方で内径はほとんど変化がなかった。3003 合金において中子境界位置を 20 mm 下とした場合のホロー内面の写真を図10に示す。図7 (中子境界位置が外周部モールド上端から 60 mm 下方, テーパー角 θ , 降下速度 45 mm) と比較するとホロー内面のリップル幅が大きく, また軽度の再溶解が生じ内面が乱れていることがわかる。

4.4.2 中子テーパー角度の影響

中子テーパー角が大きいかほど铸塊と中子間のエアギャップが大きくなり, 断熱部領域が厚くなるために再溶解現象が発生しやすくなる。ここでは, 冷却水循環式中子における中子角度が内面性状に与える影響を知ることを目的とした。

中子テーパー角度を θ 及び 2θ とした中子を準備し, 1070, 3003, 5052, 6061, 6063 の各合金を铸造し, 両角度でのホロー内面セル層の厚さ, 内径, 中子境界部からのズンプの深さを

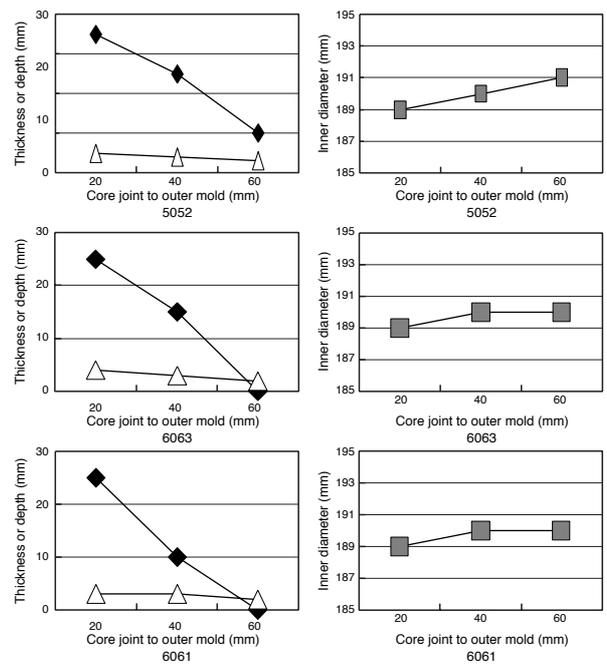


図9-2 中子境界部分の位置とホロー内面セル層の厚さ、内径及び铸造中ズンプ深さの関係 (5052, 6063, 6061)
Coarse cell-boundary thickness, sump depth or inner diameter vs. core-joint level (5052, 6063, 6061)

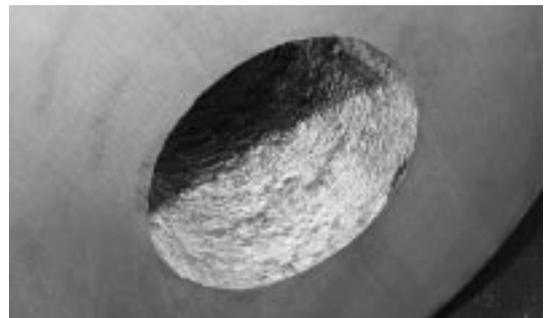


図10 冷却水循環式中子を用いて铸造した3003インゴットのホロー内面性状 (中子のアルミ合金部と耐火物部の境界位置が, 外周部モールド上端から 20 mm 下方, テーパー角 θ) (1070, 3003)
Inner-surface smoothness of a 3003 ingot, with water-circulation core, 20 mm in core joint to outer mold, θ in core taper angle and 45 mm/min in casting rate

測定した。なお, ここでは中子境界位置を外周モールド上端より 60 mm 下方, 降下速度を 45 mm としてすべての铸造を行った。

図11に中子テーパー角度の, それぞれの測定項目に対する影響度を表したグラフを示す。いずれの合金においてもテーパー角度 θ の方でセル層が薄く均一であり, 内面性状も良好であった。またズンプ深さは角度 θ の方がやや浅くなっていた。一方で両角度でのホロー内径に差はほとんどなかった。

図13には, 3003にて 2θ の中子テーパー角度で铸造した際のホロー内面写真を示す。再溶解が発生しており, 図7と比べると明らかに内面性状が悪い。したがって中子角度がホロー内面性状へ及ぼす影響はかなり大きいといえる。

4.4.3 鑄造降下速度の影響

鑄造条件のなかで凝固形態及び鑄塊組織に最も影響を及ぼすのは鑄造降下速度であった。ここでは1070, 3003, 5052, 6061, 6063の各合金を45 mm/min, 50 mm/min, 55 mm/minの各降下速度にて鑄造し、それぞれの条件におけるホロー内面セル層の厚さ、ホロー部内径及び中子境界部からのズンプの深さを測定した。

図12に降下速度条件のそれぞれの測定項目に対する影響度を表したグラフを示す。いずれの合金においても降下速度の大きいほうでセル層が薄く均一であった。しかしホロー内径は縮小していた。また内面性状についても、降下速度が大きいほうが再溶解は見られなかった一方で3003, 5052, 6063, 6061においては若干の凹凸が観察された。ズンプ深さは降下速度が大きいほうが深くなっていった。図14には、3003にて55 mm/minの降下速度で鑄造した際のホロー内面写真を示す。

5. 考察

今回の冷却水循環式中子を用いてのホローインゴット鑄造において得られた結果から、ホロー内面性状に及ぼす因子についての考察を行った。

(1) 中子境界位置の外周鑄型に対する位置関係

中子の上部耐火物と下部アルミ合金部との境界が、外周モールド上端位置に対して下方に来るほど再溶解は緩和され、ホロー内面性状は良好となる。これは中子が溶湯ズンプ終端位置に近づいてくることにより、高温の溶湯領域から離れてくるため、熱による影響が小さくなり凝固殻が再溶解されにくくなるためであると考えられる。

(2) 鑄造条件

凝固形態及び鑄塊組織に最も影響を及ぼすのは鑄造降下速度である。結果より、降下速度が大きいほど内面性状の程度は悪

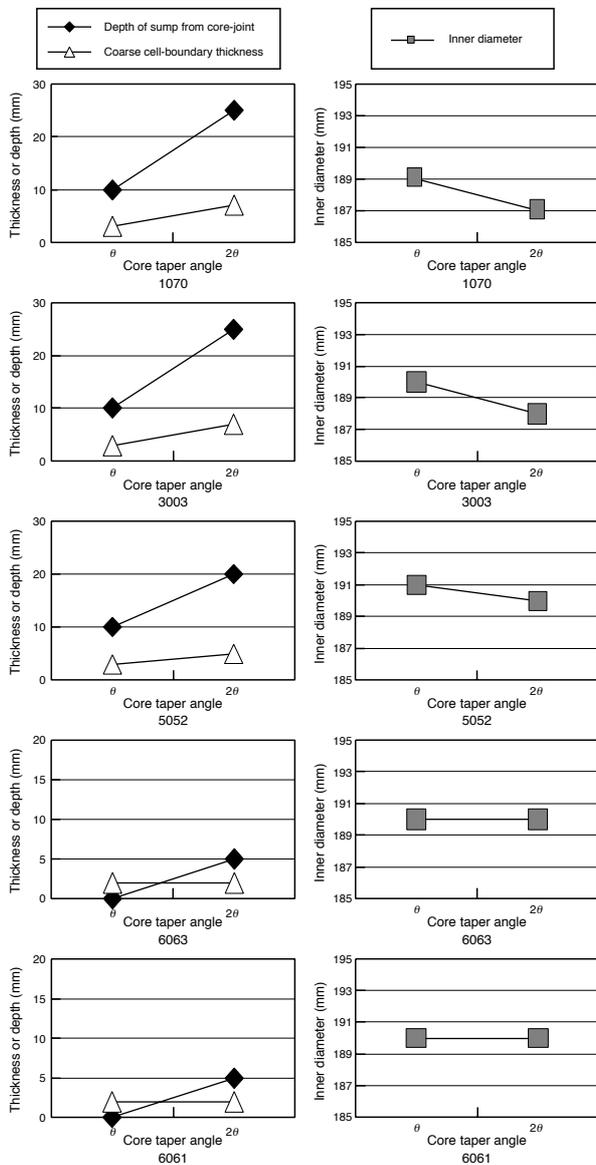


図11 中子テーパ角度を θ , 2θ とした際のホロー内面セル層の厚さ・ズンプ深さ・内径
Inner-surface coarse cell-boundary thickness, sump depth or inner diameter at core taper angles of θ and 2θ

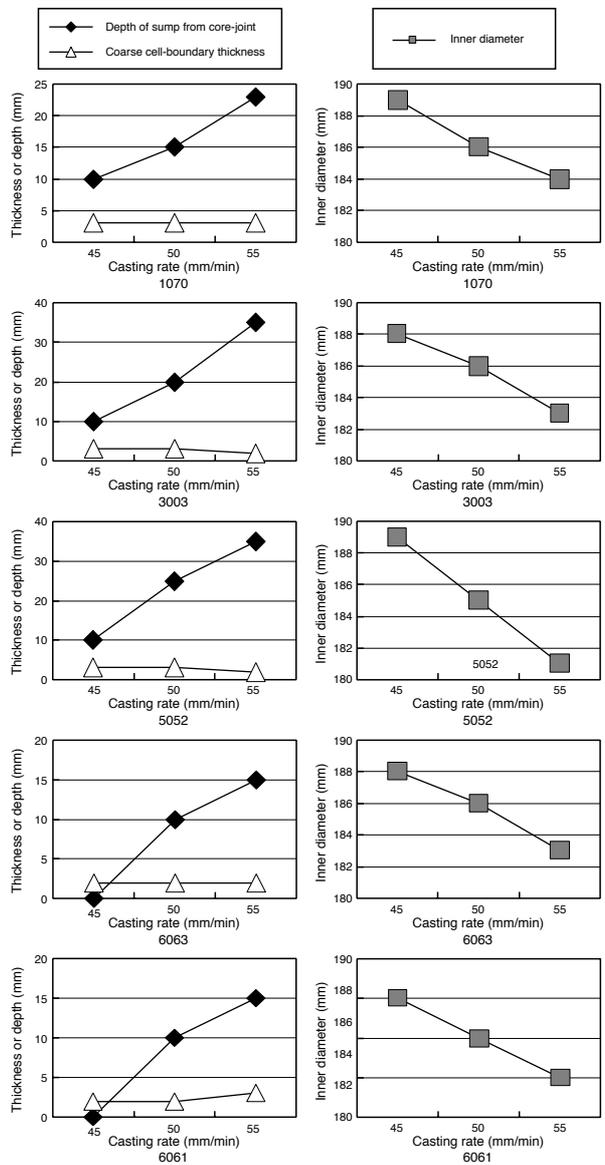


図12 各降下速度条件におけるホロー内面セル層の厚さ・ズンプ深さ・内径
Coarse cell-boundary thickness, sump depth or inner diameter vs. casting-rate

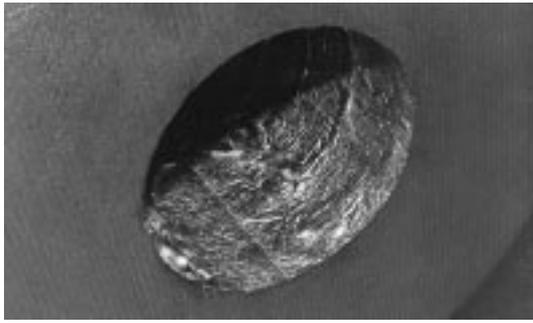


図 13 冷却水循環式中子を用いて鑄造した 3003 インゴットの
ホロー内面性状（中子のアルミ合金部と耐火物部の境界
位置が、外周部モールド上端から 60 mm 下方、テーパ
角 2θ 、降下速度 45 mm/min の場合）
Inner-surface smoothness of a 3003 ingot, with water-
circulation core, 60 mm in core joint to outer mold, 2θ in
core taper angle and 45 mm/min in casting rate

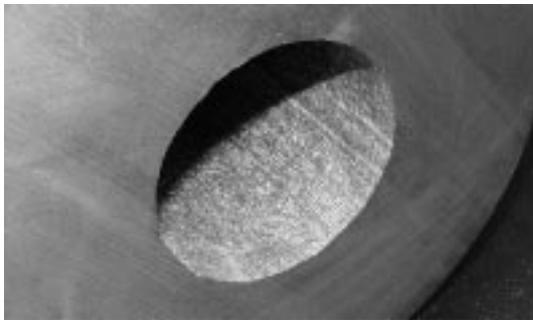


図 14 冷却水循環式中子を用いて鑄造した 3003 インゴットの
ホロー内面性状（中子のアルミ合金部と耐火物部の境界
位置が、外周部モールド上端から 60 mm 下方、テーパ
角 θ 、降下速度 55 mm/min の場合）
Inner-surface smoothness of a 3003 ingot, with water-
circulation core, 60 mm in core joint to outer mold, θ in
core taper angle and 55 mm/min in casting rate

くなり、ホロー内径は縮小化した。

ホロー鑄造における凝固収縮もソリッド鑄造と同様に中心方向に向かって進行する。そのため降下速度のアップにより冷却速度が大きくなった分、内径もその分収縮して小さくなったと考えられるが、その程度は予想以上に大きいものであった。

このような収縮現象が生じた場合、中子のアルミ合金部側面とホロー内面のエアギャップは小さくなり、再溶解は小規模となり内面性状は改善されるはずであるが、実際にはホロー内面の円周方向に凹凸が繰り返されており、再溶解とは形態が異なっていた。この現象は、冷却速度が大きくなった分凝固時の収縮力が大きくなり、これが内面に沿った圧縮応力として加わったために、生成した内面凝固殻が押し曲げられて生じたものと考えられる。

6. おわりに

ホットトップ鑄造におけるホロー形成用の冷却水循環式中子を開発し、これを使用しての鑄造を行い、以下の結果を得た。

- (1) 全合金において、冷却水循環式中子を用いたホローインゴット鑄造の量産化に成功した。内面性状は従来方式に比し著しく改善できた。
- (2) 内部組織はホロー内面のセル層が約 3 mm の厚さで安定し、それより外側では粗大晶もなく従来に比し良好であった。切削代は従来片側で 12.5 mm であったものを 5 mm まで削減できることが確認できた。
- (3) ホロー内面の切削速度が従来比で 53 % 向上できた。
- (4) 中子を構成する耐火物部とアルミ合金部の境界位置と外周モールドの相対位置、そして中子のテーパ角度及び鑄造降下速度のホロー内面性状に対する影響度を確認し、最適条件を確立することができた。

なお、本開発品に関しては現在、特許出願中である。

参考文献

- 1) 松尾 守: スカイアルミニウム (株) 技術研究所 (深谷市), アルミニウムの連続鑄造, 軽金属 vol.39 1989, 日本軽金属学会, P530
- 2) 石井 洋, 高杉 篤美, 阿部 正巳, 加藤 和美: 古河アルミニウム工業 (株) 小山事業所 (小山市), 中空ビレットの製造方法, 公開特許公報: 平 1 249241