水モデル実験によるフロート式 DC 鋳造ビレットの 結晶粒微細化機構の検討

穴田 博*・小林 寛史**・佐治 重興*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 52, No. 2 (2002), pp. 24-28

Examination by water model on the grain refining mechanism in float type DC-cast billets

Hiroshi ANADA*, Hiroshi KOBAYASHI** and Shigeoki SAJI*

The distribution of crystal grains for 6061 DC billets cast using the float was studied, the results were as follows; the fine crystal grains were near the center of billets and the coarse one was near the edge of float. These results suggest that metal flow in mold affected to the grain refining effects of DC billets. To examine the molten metal flow in mold, we used by water model experiment and made clear the relation between float design and the metal flows. It was confirmed that the metal flow at the neighborhood of mold center was as strong as origination of vortexes on the solidifying surface, which was strong with decreasing float diameter. The grain refining effect at center zone of DC billets is presumed to the subdivision of dendrite arms produced by a steering flow at the solidifying surface and the distribution of the dendrite segments over the mold.

(Received May 25, 2001)

Keywords: DC cast, grain refining, granular crystals, water model, metal flow

1. 緒 言

加工用アルミニウム合金鋳塊のミクロ組織としては一般に均一微細な等軸結晶粒を持つものが好まれ、その方策として Al-5 mass% Ti-1 mass% B 合金等の微細化剤の添加がなされている。しかしながらフロート式 DC 鋳造において微細化剤添加の6061合金ビレットのミクロ組織を調べると、鋳塊の中心部や外周部近傍で結晶粒が細かく、フロートの外周付近で粗大な結晶粒となることがわかった。特にこの粒度分布特性がフロートの外径ならびにスリット位置と相関することから、鋳塊の結晶粒微細化と鋳型内における溶湯の流れに密接な関係があるものと推察された¹⁾。

鋳造時における鋳型内の溶湯流れを直接観察することは不可能である。しかしながら「レイノルズ数の等しい液体の流れは相似する」という相似則があることから、数分の一に縮尺した透明な鋳型模型を用い、密度や粘性係数を調整した液体を選んで流れを直接観察する実験は多くなされている。たとえば最近 Gupta らは鉄の連続鋳造における鋳型内のフローパターンの解析に、ペンゼンとカーボンテトラクロライド混合液を用いた観察結果を報告し^{2)~5)}、また鋼のスラブの連続鋳造について Honeyands ら⁶⁾、三宅ら⁷⁾はそれぞれ水モデルによる流動解析を試みている。一方アルミニウムについては700℃前後のアルミニウム合金溶湯の動粘性係数(粘性係数/密度)が常温の水のそれに極めて近いことなどから、ダイカスト鋳造⁸⁾、スラブの DC 鋳造^{9),10)}、低圧鋳造¹¹⁾、超音

波振動付加時の鋳型内の流れ解析¹²⁾等に広く水モデル実験が応用されている。

本研究は、フロート、鋳型ならびに凝固界面の1/4模型を作製し、水モデルにより鋳型内溶湯の動きを調べ、DC 鋳造ビレットに生じた特異な結晶粒度分布の要因の検討を目的として行った。

2. 実験方法

2.1 実験装置および流れの観察方法

Fig. 1 に水モデル実験装置全体の概略を示す。温度調節された一定流量の水がポンプで中央の透明パイプ A に送られ、連通管となっているパイプ B の上端からオーバーフローしてもとの水槽に戻る。パイプ A は鋳型の役割を果たし、この上端のフロートが浮かぶ水面の高さは、パイプ B の高さによって一定に保持される。

フロートを通して鋳型に入った水の動きは、マーカ液により着色して観察・撮影を行った。流れの観察は二段階で行われ、第一段階ではフロート形状ならびにフロート底面に設けた細長の溶湯供給孔(以下スリットと呼ぶ)の位置がもたらす対称および非対称断面での流れの相違を比較し、第二段階では中型フロートの凝固界面模型をフロート下部に設置し、凝固界面が流れに及ぼす影響を検討した。

Fig. 2(a)はフロート模型の対称縦断面(Y-Y)、非対称縦断面(X-X')を示す。フロート形状は3種とし Table 1 にそれぞれ各部の寸法を示す。Fig. 2(b)にはフロート底面か

* 富山大学工学部 (〒930-8555 富山県富山市五福3190)。Faculty of Engineering, Toyama University (3190, Gohoku, Toyama-shi, Toyama 930-8555).

** 富山大学工学部学生(富山市)〔現在: マックスサイエンス(株)(加賀市)〕。Student, Toyama University [Present: Maxscience Co., Ltd. (Kaga-shi, Ishikawa)].

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set up.

Table 1 The dimensions of each part corresponding to float shown in Fig. 2(a) (mm)

Float type	a	b	c	d	e	f	g	h
A	8.75	20.00	40.00	4.25	3.75	3.75	3.50	27.50
B	8.75	17.00	35.00	4.00	4.25	3.75	3.50	22.50
C	7.50	13.50	27.50	2.50	3.50	3.50	3.00	20.00

ら見たスリットの形状, ならびに Y-Y, X-X' 断面の観察のための光の入射方向ならびに撮影方向を示す。図中のスリット周辺の P, P' および Q, Q' の各点は, マーカ液滴下の注射針の先端位置を示す。これは微量調整のため Fig. 1 のように点滴用セットに連結されている。マーカ液にはエタノールを添加した黒色の墨汁を使用した。

パイプ A における Y-Y (あるいは X-X') 断面での流れを二次元的に観察・記録するために, スリットを通し平面光をそれぞれの向きに平行, かつパイプ A の直径を通るように照射したところ, そのままでは像がパイプ外周部側に近いほど拡大されることがわかった。そこでパイプ A の外部に更に可動式の直方体ケースを取付け, これにも水を満たし二重の屈折を行わせたと外周部の歪みが解消できた。

観察および撮影は, 照射した平面光 (約 1 mm 幅) 以外の光の侵入を避けるため, すべて暗室状態の中で行った。フィルムには富士フィルム NEOPAN400 を用い, シャッター速度 1/60 s, 絞り 1.7 とした。

Fig. 2 Schematic diagram of float. (a) float vertical design; Y-Y: symmetric section, X-X': unsymmetrical section. (b) relation between lighting direction and photographing one at float bottom. P, P', Q and Q' show dropping points of marker solution.

2.2 レイノルズ数と流量の算出

一般にパイプ内の流れについては液体の種類によらず (1) 式が成立し, レイノルズ数が等しいものは流れも相似する。

$$Re = \rho \cdot v \cdot d / \mu \quad (1)$$

Re : レイノルズ数, ρ : 密度, v : 流速, d : パイプ径, μ : 粘性係数

そこで 6061 合金の 700°C の密度ならびに粘性係数を純 Al により代用させて, 実際鋳造の Re を 249.97 と算出し, これに合せ水量の算出を行った。Table 2 は実際の鋳造条件, ならびにアルミニウムと水の各条件下での密度, 粘性係数に関する物性値^{(13),(14)}から算出した実験条件を示す。条件 1, 2 の比較から, 水温を 50°C に上げると流速を約 1/2 程度に抑えら

Table 2 Physical properties and experimental conditions of 6061 aluminum alloy and water

	Casting condition of 6061 aluminum alloy	Water model condition 1	Water model condition 2
Temperature (°C)	700	50	20
Density (kg/m ³)	*2.369	0.988	0.998
Viscosity (poises)	*2.9 × 10 ⁻²	5.49 × 10 ⁻³	10.09 × 10 ⁻³
Diameter (mm)	204	50	50
Casting speed (m/s)	1.5 × 10 ⁻³		
Flow speed (m/s)		2.7 × 10 ⁻³	5.1 × 10 ⁻³
Reynolds' number	249.97	249.97	249.97

* value to pure Al

Fig. 3 Fluid flow patterns taken at symmetric section (Y-Y section); A1~A3 and C1~C3 correspond to Float A and Float C in Table 1, respectively. The subscript number as 1 to 3 shows the observed order.

れ撮影条件に有利なことがわかり、水温を50℃として実験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 対称断面における溶湯の流れ

Fig. 3は大型フロートと小型フロートについての対称断面(以降 Y-Y 断面)に見られる流れの経時変化を示す。これより Y-Y 断面に見られる流れはフロート径の大小にかかわらず左右対称的な流れを示すことがわかる。またフロート径が大きいものでは時間経過とともに流れが拡散する傾向があるのに対し、小さいものほど鑄型中心部に集中する傾向がある。これはフロート径が小さいものはスリットの開口面積も小さく、したがって流れは下方に向かって勢いがあり、その反面外周方向に拡散する傾向は小さくなるためであろう。なお撮影装置の都合上、A1→A3 ならびに C1→C3 の経過時間の測定は不可能であったため、写真から流れの速さを求めて比較することはできなかった。

3.2 非対称断面における溶湯の流れ

Fig. 4に非対称断面 X-X'における流れの変化を示す。A1→A3, B1→B3, C1→C3 の3組の写真はそれぞれ大, 中, 小のフロートに対応している。いずれも左右同時にマーク液を滴下しているにもかかわらず、A1, B1, C1 いずれにおいても X 側の流れのみが観察され、X' 側に流れはないように見えるが、詳細にみると B1 や C1 に微かな変化が見られ、X' 側ではマークがフロート底面に沿って水平に動いていることがわかる。A2, B2, C2 段階のマークにより、X' 側の流れはフロート底部に沿って中心方向に引込まれた後、下方に向かうことがわかる。A3, B3, C3 によればその後は全体的に右にシフトしながら混じり合い、非対称な流れが観察された。フロート径が大きいほど鑄型内全体への拡散傾向がみられ、スリットからの流出速度の大きい小型フロートでは外周方向への流れの拡散傾向はほかに比べて小さい。

Fig. 5は大型フロートと中型フロートそれぞれの Y-Y, X-X' の両断面での定性的流れを比較した。Y-Y 断面でフロート径による差は明瞭ではない。一方、X-X' 断面の X' 側におけるフロート底部への回り込みはスリットからの流れが強い

Fig. 4 Fluid flow patterns taken at unsymmetrical section (X-X' section); A1~A3, B1~B3 and C1~C3 show photographs obtained with Float A, Float B and Float C in Table 1, respectively. The subscript number shows the observed order.

Fig. 5 Comparison of fluid flow patterns at Y-Y section and X-X' section to Float A and Float B.

Fig. 6 The influence of solidifying surface on fluid flow patterns at Y-Y section of DC casting mold used Float B.

Fig. 7 Schematic diagram showing grain refining mechanism caused by melt flow in mold of DC cast used float; (a): Y-Y section, (b) : X-X' section.

ほど激しい。全体的にはY-Y断面での流れはほぼ中心軸に対称であるのに対し、X-X'断面ではX'側に偏る傾向がある。

3.3 流れに及ぼす凝固界面の影響

前項までの結果より、スリットを通った溶湯の大部分はそのまま真っ直ぐ下方に運ばれることがわかった。しかしながら実際の casting 時には鋳型内の定位置に凝固界面が形成され、特にアルミニウムの casting では湯面からの距離が短いため、溶湯流れに影響を与えるものと推測される。しかし凝固界面の位置や形状の特定が難しいためか、水モデル実験でこの影響について言及している報告はみられない。幸いにして本実験に関しては各フロートについての凝固界面の位置、形状が求められており¹⁾、ここでは中型フロートについて凝固界面モデルを作り実験した。

実測した中型フロートの凝固界面はX-X'断面で見るとX側の界面がやや下方に膨らんでいるものの、X'側との差違がほとんどなく、そこでモデル作製に当たってはX側の形状を基にしCAD/CAMシステムにより3次元図形化し、透明アクリルブロックからNC旋盤を用いて加工し実験に供した。

Fig. 6はフロートならびに凝固界面模型の存在下におけるY-Y断面での流れの経時変化を示す。いずれの段階でも極めて対称性のよい流れとなり、個々に見ると(a)はスリットからの下降流が途中で下方から内に巻く渦流を作りながら凝固界面に達する様子を示す。(b)は凝固界面に到達し、そこで激しい攪拌流を生じる様子を示す。(c)より凝固界面を攪拌した後は、一部の流れは凝固界面沿いに鋳壁方向に上昇し、また一部はフロート底部領域にて循環する様子がうかがえる。しかしながらFig. 6に見られる結果については、実際 casting 時に生じる溶湯の温度変化の影響が加味されていないものである。溶湯の温度は凝固界面に近いほど低くなるはずで、溶湯温度の低下につれて溶湯の密度、浮力そして粘性の増大を招くであろうから、実際の溶湯の動きとしては凝固界面に近づくほどにFig. 6に比べて幾分直線的な動きとなることが予想される。またFig. 6(c)で明らかな凝固界面に沿った上向きの流れについては、本来の溶湯が凝固によって消費されるのに対し、本実験では鋳型内の水は凝固界面模型の上端からオーバーフローする構造となっており、この影響を無視することはできない。この点に関し、本法に比較的好く似た凝固形態をとる縦型ゾーンメルティング法について、最近のLanの報告¹⁵⁾が参考となる。彼はGaAsの単結晶作製時の凝固界面の形状と流れの関係をシュミレーションにより求

め、その結果、凹型の凝固界面においては、中心から下降して界面に沿って鋳壁に向かう左右対称の二つの対流の存在を明らかにしている。また界面に沿った流れは鋳壁に近いほど激しくなると指摘している。これを参考にすると、定常な凝固界面を維持している実際の casting 時にも、本実験で観察されたような凝固界面に沿って鋳壁に向かう流れの存在が十分推測される。

3.4 フロート式DC casting ビレットの結晶粒微細化の機構

フロート式DC casting ビレットに見られた特徴的な結晶粒度分布について、これがフロート径あるいはスリット位置とよく対応し変化することと、また算出した鋳型内各部の温度勾配から、フロート底部領域における高温溶湯の対流の存在を推定し、フロート底部に生じた結晶核の中心部での堆積が原因と推定¹⁾していた。本実験の結果をまとめると、鋳型内の溶湯の動きは観察断面で異なり、またスリットからの下降流が予想以上に強いことから、これらをもとに本法による粒度分布、結晶粒微細化機構の模式図を作った。

Fig. 7は対称断面と非対称断面に分けて、先報の等軸結晶粒の分布結果と本実験で得た溶湯流れとを組合せて示す。対称断面Y-Yでは流れも結晶粒度分布も共に軸対称であるのに対し、非対称断面X-X'ではスリット閉口部X'側に流れが偏寄し、またこれに乗じるように細かな結晶粒がX'側に多くなることを示すとともに、結晶核の発生サイトについては、フロート底部ではなく凝固界面にあるとしている点に特色がある。

ビレットにおける結晶粒微細化について先報では、結晶核の生成サイトとして、鋳壁や凝固界面よりむしろフロート底部を考えており、ここで生じた「遊離結晶」¹⁶⁾が、鋳型中心部に発生していると予想した対流により、中心部に集中的に沈降し堆積するものと推論していた。本実験のFig. 5からもフロート底部に回り込む恒常的な流れが確認され、この流れが結晶を遊離させる可能性は否定することはできないが、その一方でそうして生じた遊離結晶が格別な高温溶湯下で再溶融する可能性も大きいに違いない。しかしながらFig. 6で明らかなように、スリットから流入した溶湯はそのまま凝固界面に達するものが多く、それにより凝固界面で激しい攪拌流を生じることから、これが中心部での結晶粒微細化の主因となっている可能性が十分考えられる。

凝固界面における溶湯流の影響については、未凝固溶湯の均一化による結晶生成を促進する効果、ならびにデンドライト枝の分断による微細化効果¹⁷⁾が言われている。このうちア

ルミニウム合金について凝固時の攪拌流によるデンドライト枝の分離による結晶粒微細化については、Fremings のレオキャスト法¹⁸⁾はじめ攪拌が微細化に有効であるとの報告が多く^{19)~21)}、最近では上谷ら²²⁾は凝固界面直上における機械的攪拌による微細化効果を報告しており、その効果は十分実証済みと言えよう。Fremings²³⁾によればデンドライト枝の分断に要する剪断応力については、Al-4%Si 合金の例ではあるが、固相率20%以下ではほとんど無視でき、またデンドライトは溶湯内を自在に移動できるとしている。

以上を参考にすれば、本実験においても認められた凝固界面での攪拌流が成長中のデンドライト枝を分断する可能性もまた十分考えられることから、これらをまとめて Fig. 7 の模式図とした。鋳塊中心部分に生じる微細結晶粒領域は、デンドライトの分断により生じたと考えられる結晶粒が、中心部での内巻きの対流により鋳壁方向への拡散を妨げられたために生じたものであろう。また溶湯流れが直接界面に達する地点においては、結晶核が堆積しにくく、そのため粗大結晶が生成しやすいものと考えられる。鋳壁近くでの微細領域は鋳壁を核サイトとする結晶によるものであろう。

以上のように、本法によるビレットのマイクロ組織はフロート形状と密接に関係する。非対称な結晶分布を防止するにはスリットを連続させる構造²⁴⁾が、そして断面全体で均一サイズ of ビレットを求める場合にはスリット位置を鋳壁側に近づけるとともに、溶湯の向きをも鋳壁方向に分散させるフロート設計が有効と考えられる。

4. 結 言

鋳造ビレット横断面に見られる特徴的な結晶粒度分布の原因を検討するため、水モデルによりフロート式 DC 鋳造における鋳型内溶湯の動きの可視化を試み、フロート形状に合わせて対称、非対称断面での流れを解析することができた。得られた結論は次のように要約できる。

(1) 左右にスリットを有する対称断面に見られる流れは軸対称で、スリット直下に強い流れを生じる。非対称断面では閉口部側の流れが弱く拡散流が生じやすい。

(2) スリット閉口部側からフロート底面に沿ってスリット側に引き寄せられる流れが存在する。

(3) フロート径が小さく、したがってスリットから流出速度が大きいものほどフロート底部領域に強い流れの領域を形成する。この流れが強いものほど、対称、非対称断面による流れ差は生じにくい。

(4) 凝固界面には強い攪拌流が存在し、界面の攪拌効果が結晶粒微細化作用をなしているものと推測される。

本研究の遂行に当たり、流れの可視化ならびに装置の改良に適切な助言をいただきました富山大学工学部 吉田正道助教授、ならびに凝固界面模型の作製にご協力いただきました富山大学工学部実習工場 二宮英治技官に深く感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 穴田 博, 山下友一, 梶田浩二, 中平 昊, 池野 進, 佐治重興: 軽金属, **47** (1997), 644.
- 2) Dharmendra Gupta, S. Subramaniam and A. K. Lahiri: Steel Research, **62** (1991), 496.
- 3) Dharmendra Gupta and A. K. Lahiri: Metall. Trans., **25B** (1994), 227.
- 4) Dharmendra Gupta and A. K. Lahiri: Metall. Trans., **27B** (1996), 757.
- 5) Dharmendra Gupta, S. Subramaniam and A. K. Lahiri: ISIJ International, **37** (1991), 654.
- 6) Tomas Honeyands and Joe Herbertson: Steel Research., **66** (1995), 287.
- 7) 三宅俊也, 仲山公規, 森下雅史, 田井啓文, 徳永宏彦: 神戸製鋼技報, **47** (1997), 52.
- 8) 中村輝直, 垣内源雄: 日本ダイカスト会議論文集, JD 94-23 (1994), 194.
- 9) 森下 誠, 徳田健二, 大家正二郎, 吉川克之: 軽金属学会第91回秋期大会講演概要, (1996), 135.
- 10) 森下 誠, 徳田健二, 吉川克之: 軽金属学会第93回秋期大会講演概要, (1997), 185.
- 11) 大西光史, 大中逸雄: 鋳物, **63** (1991), 883.
- 12) 大澤嘉昭, 佐藤 彰: 鋳造工学, **72** (2000), 733.
- 13) 日本総合鋳物センター編: 軽合金鋳物便覧, 丸善株, (1965), 4.
- 14) 日本工業用水協会編: 工業用水便覧, 産業図書株, (1958), 18, 24.
- 15) C. W. Lan: Int. J. Heat Mass Transfer., **43** (2000), 1987.
- 16) T. Motegi: 軽金属, **45** (1995), 339.
- 17) 鈔日本金属学会編: 鋳造凝固, 鈔日本金属学会, (1992), 149.
- 18) M. C. Flemings: Met. Trans., **5** (1974), 2121.
- 19) 萩原 巖, 高橋忠義: 日本金属学会誌, **29** (1965), 637.
- 20) たとえば J. Winter, J. Edantzing and D. E. Tyler: U.S. Patent, No. 15250, (1979).
- 21) 市川 冽: 鉄と鋼, **74** (1988), 51.
- 22) 上谷保裕, 高木英俊, 松田健二, 池野 進: 軽金属, **50** (2000), 203.
- 23) M. C. Flemings: Met. Trans., **22B** (1991), 269.
- 24) 室町繁雄, 穴田 博, 多々静夫, 時澤 貢: 軽金属, **30** (1980), 537.