純アルミニウムおよび Al-Cu 合金の二方向性凝固*

梶 山 正 孝** 佐 藤 彰***

Masataka Sugiyama and Akira Sato : Di-directional Solidification of Pure Aluminium and Al-Cu Alloy Ingots. An experimental work of di-directional solidification of pure aluminium and Al-Cu alloy ingots was carried out and their structures were investigated. Double-oriented ingots were obtained and their growth mechanism could be explained on the theory of preferred growth of dendrites whose growth direction $\langle 100 \rangle$ was perpendicular to the surfaces of two chills.

(Received October 25, 1971)

I. 緒 言

純アルミニウムおよびその合金鑄塊の鑄造組織が最終板の異方性におよぼす影響についてはかなり知られており、連続鑄造鑄塊からの板は普通金型鑄塊からのものより異方性が大きいことが確認されている⁽¹⁾。また溶湯の直接圧延法による Al 板の製造においても同様な結果が得られ、著者らはこれについて連続鑄造および溶湯の直接圧延では成長しつつある結晶粒の固液界面と冷却方向とを考えると、鑄型と 2 次冷却とによる二方向性凝固であり結晶粒の規制度が大きく方向性が 2 次元的であることも重要な一因であろうと考察した⁽²⁾。

純 Al および Al-Cu 合金などの面心立方金属の柱状晶の成長方向は $\langle 100 \rangle$ であり、一方向凝固された柱状晶の成長では単純繊維組織となることが知られている⁽³⁾。他方 Nereo ら⁽⁴⁾は柱状晶の成長方向を強制的に直角に変化させることによって 2 次元的に方位づけられた鋼の鑄造組織を得た。Bower ら⁽⁵⁾は Al-4.5% Cu 合金について 2 個のチルを用いる“delayed chill”法によって 2 次元的に方位づけられた鑄造組織が得られたと報告している。また阿部ら⁽⁶⁾は Nereo らと同様にして純 Al と Al-Cu 合金、Zn-1.5% Cd 合金の成長方向をデンドライト成長の優先方位方向に変化させることによって 3 次元的に整理した結晶粒の鑄造組織を得ている。純 Al および Al-Cu 合金の二方向性凝固によって得られる鑄造組織を観察したところ、2 次元的に方位づけられた組織が得られたので報告する。

II. 実験方法

チルとしては水冷鋼板を用い底面とこれに直角な一つの側面から冷却して二方向凝固させた。鑄型としては断熱レンガ(イソライト C-1)を加工して用い、柱状晶が得られる

ように 660°C に加熱した。鑄塊の大きさは 40×40×200 mm であり、底面および側面のチル面の大きさは同一で 40×40 mm である。側面のチルの位置を変化させて 2 個のチルの相対的な冷却強さを変えたときの鑄造組織におよぼす影響を調べた。供試材は純 Al (99.85% Al) およびこれに Al-33~35% Cu 母合金を用いて 1.0, 2.0, 3.0, 4.0% Cu を添加した合金である。鑄込温度は 750°C と一定とした。得られた鑄塊のマクロおよびミクロ組織を観察した。ミクロ組織は柱状晶の成長方向と直角な面を観察し、純 Al ではエッチピットから、Al-Cu 合金では + 印から結晶粒の方位を調べた。

Fig. 1 は鑄型の型とミクロ組織観察用試片の採取位置を示す。二方向性凝固としては側面チルより上の部分を考慮して A, B, C, D 型でそれぞれ A 6, B 8, C 10, D 12 の位置の組織を検討した。D 型の D 5 の位置では底面チルからの一方向凝固と考えられるので、一方向凝固試料として参考とした。多ペン式温度記録装置と 0.32 mm φ アルメルクロメル熱電対とを用いて各型の鑄型の各位置における鑄塊の冷却曲線を求めた。

III. 実験結果

1. 冷却曲線

Fig. 2 は各型の鑄型の各位置における鑄塊の冷却曲線を示す。側面のチルが各位置の冷却速度におよぼす影響が明らかに認められ、A 型がもっとも一方向冷却に近く、D 型では温度勾配が著しく小さくなることが確かめられる。

- (1) たとえば、畑、竹内：金属学会誌，**18** (1954)，371；池野、柴田：軽金属，**13** (1963)，13；網谷：金属学会誌，**24** (1960)，765，769。
- (2) 梶山、福迫、佐藤：金属学会誌，**33** (1969)，1109。
- (3) たとえば、B. Chalmers：Principles of Solidification, (1964)，91；C. Barrett：Structure of Metals, (1952)，510。
- (4) G. E. Nereo, R. F. Polich and M. C. Flemings：Trans. AFS, **73** (1955)，1。
- (5) T. F. Bower and M. C. Flemings：Trans. AFS, **75** (1967)，433。
- (6) 阿部、戸叶：金属学会誌，**34** (1970)，149。

** 東京大学工学部 (Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

*** 東京大学大学院，現在：金属材料技術研究所 (Graduate School, University of Tokyo, Tokyo. Present address：National Research Institute for Metals, Tokyo)

* 1970 年 4 月本会東京大会に発表

Fig.1 Types of di-directional cooling molds and specimen numbers for microstructure observation

Fig.2 Cooling curves of di-directional solidified ingots in each type mold

2. マクロ組織

Photo. 1, 2, 3は純 Al, Al-1.0% Cu, -2.0% Cu 合金の二方向性凝固された鑄塊のマクロ組織を示す。純 Al と Al-1.0% Cu 合金では全ての鑄塊が柱状晶であった。Al-2.0% Cu 合金では D 型の鑄塊だけが沈降した結晶粒と考えられる粒状晶が底面チルと側面チルから発達した柱状晶の間に観察される。Al-3.0% Cu, -4.0% Cu 合金では粒状晶が多く全体が柱状晶の鑄塊は得られなかった。2.0, 4.0% Cu 合金の A 型鑄塊でも観察されたが、3.0% Cu 合金では羽毛状晶の発達が著しく、A 型では鑄塊のほぼ全面が羽毛状晶から成ることが観察された。

純 Al, Al-1.0%, -2.0% Cu 合金鑄塊のマクロ組織にお

いて組織観察のための腐食の度合が各結晶粒ではほぼ等しく、ほぼ同じ方位に配列されていると考えられるものが認められる。

3. ミクロ組織

Photo. 4, 5, 6は純 Al, Al-1.0%, -2.0% Cu 合金鑄塊のミクロ組織を示す。底面のチル面は紙面と平行で、熱は紙面に直角に表から裏へ流れる。側面のチルは紙面と直角に図の右側にあり、熱は紙面と平行に左から右へ流れる。純 Al と 1.0% Cu 合金では、一方向凝固の鑄造組織とほぼ同様であると考えられる PD5 と 1 CD5 に比較すると、明らかに 2 次的に方位づけられた結晶粒から成る。結晶

Photo.1 Macrostructures of pure Al ingots

Photo.2 Macrostructures of Al-1.0% Cu alloy ingots

粒の $\langle 100 \rangle$ 方向は底面と側面のチル面に対してほぼ直角であることが示される。純 Al と 1.0% Cu 合金では認められなかったが、2.0, 3.0, 4.0% Cu 合金の A 型鋳塊では羽毛状晶が得られた。羽毛状晶も 2 個のチル面にほぼ直角に成長しており、これを 2 次的に方位づけられた結晶粒と考えることも可能であるかもしれないが、羽毛状晶の成長機構は複雑であり今後更に検討する必要がある。2.0% Cu 合金の B 型鋳塊ではほぼ全体が 2 次的に方位づけられた結晶粒から成るが、C 型では一部分が 2 次的に方位づけられているものの余り強い規制がないようである。2.0% Cu 合金の D 型と 3.0% Cu, 4.0% Cu 合金の B, C, D 型鋳塊では、デンドライトの枝の発達が著しく 2 次的に

方位づけられた組織は得られなかった。2 次的に方位づけられた組織は底面チルと側面チルの位置が等しく直角な二方向の冷却強さがほぼ等しい場合、すなわち B 型鋳塊において得易いことが認められた。

IV. 考 察

二方向性凝固において 2 次的に方位づけられた組織は結晶粒の $\langle 100 \rangle$ 方向が 2 個のチル面に対してほぼ直角であることが示されたが、これは成長方向を直角に変えた場合と同様の理由から説明されるものと考えられる。すなわち一つのチル面から成長する結晶粒の成長方向は $\langle 100 \rangle$ であるから、この結晶粒が成長してもう一つの直角方向の

Photo.3 Macrostructures of Al-2.0% Cu alloy ingots

Photo.4 Etch pits of pure Al ingots

チルによる冷却によって成長する場所に到達すると、それまでの成長方向と直角な $\langle 100 \rangle$ 方向に成長する。したがって直角な位置の 2 個のチル面に対して $\langle 100 \rangle$ 方向が垂直である結晶粒が優先成長することになる。C 型と D 型鋳塊では冷却曲線から明らかなごとく二方向性凝固する位置においては冷却速度が遅く、温度勾配が小さいためデンドライトの枝が発達し易い条件にあり、またもっとも上方の結晶粒がマクロ組織から観察されるようにチル面に対して傾斜して成長するため 2 次的に方位づけられた組織が得難かったものと考えられる。したがって Bower らが示し

ているようにチル面を傾斜させて最初に成長する結晶粒を試料軸と直角に成長させるならば容易に 2 次的に方位づけられた組織が得られるであろう。

連続鋳造および溶湯の直接圧延では 1 次冷却である鋳型から成長した結晶粒が、強い 2 次冷却によってその成長方向を変えられるため、2 次的に方位づけられた組織が得られるものと考えられる。また純 Al の連続鋳造鋳塊において羽毛状晶が発達して観察されることも二方向性凝固が一因であろう。鋳型面から成長した結晶粒が 2 次冷却による冷却によって彎曲されて成長しているように観察される

Photo.5 Microstructures of Al-1.0% Cu alloy ingots

Photo.6 Microstructures of Al-2.0% Cu alloy ingots

ことも同様にして容易に説明される。すなわち Fig.3 に示されるように熱流方向と平行に近い結晶粒の成長方向

Fig.3 Relation between the growth direction of a columnar dendrite and the dendrite growth direction $\langle 100 \rangle$

$\langle 100 \rangle$ が優先成長することによって柱状晶が彎曲して成長したように観察され、2 次的に方位づけられた組織となるものと考えられる。

純 Al および低濃度合金で明らかに 2 次的に方位づけられた結晶粒から成る組織が得られ、高濃度合金でこのような組織が得られなかったのは、高濃度合金の場合には柱状晶よりも粒状晶が発達しやすくなるため完全に優先成長する結晶粒がなくなるためと考えられる。

V. 総 括

純アルミニウムおよび Al-Cu 合金の二方向性凝固によって得られる铸塊の铸造組織を観察したところ、2 次的に方位づけられた組織が得られ、成長方向 $\langle 100 \rangle$ が 2 個のチル面に垂直な結晶粒の優先成長機構によって説明できることが示された。