

鑄塊の凝固組織に及ぼす湯面振動の影響と組織の

70537

コントロールについて*

大野篤美**・早田博***

Effect of the Molten Surface Vibration on the Cast Structure of Ingots and Controlling the Structure

Atsumi OHNO and Hiroshi SODA

synopsis:

The authors have already proposed that most of the crystallites which form an equiaxed zone originate at the initial stage in the upper part of the growing interface, then fall along the interface to the bottom. The present work using vibrations and agitation on the molten metal in the mold, clearly confirmed the above mechanism. The molten surface vibration at the initial stage of solidification is very important for controlling the ingot structure. Several pouring methods were applied to aluminum-0.2% copper alloy ingot casting: top pouring, bottom pouring, pouring with pencil ring gates, and pouring into a tilting mold. The resulting macrostructures showed that the pouring process which produces violent wave action at the point where molten surface touches the side of the solid shell is most effective for the formation of a fine equiaxed structure. In addition, the pouring temperature should be as low as possible.

(Received June 23, 1969)

1. 緒 言

溶湯に振動または攪拌をあたえることによつて、鑄塊の結晶粒が微細化し、等軸晶領域が拡大することが知られている。しかしながら、その微細化機構については明らかでなく、結晶が振動または攪拌によつて、機械的に細分化されるとか¹⁾、あるいは、結晶核が安定になるための臨界サイズが小さくなる²⁾ためとか説明されてきた。

これらは結晶核が溶湯中で生成するという考えにもとずいたもので、これらの説明にしたがうと、結晶微細化のためには、溶湯全体に振動をあたえることが必要になり、このことから、小さな鑄塊には振動は効果的に働くが、大型鑄塊には大きな振動エネルギーをあたえないかぎり、振動エネルギーが吸収されるのみで、有効に結晶の微細化に働かないと考えられてきた。

著者はさきに、等軸晶領域を形成する結晶の核たるべき結晶微粒子は、溶湯中における核生成によるのではなく凝固殻の結晶の幹や枝の溶断遊離によつて生成されること、その溶断遊離は、凝固初期に、温度の繰返し変動によつて起こること、その溶断は湯面と凝固殻のコーナーにおいてもつとも起こりやすいことを明らかにした¹⁰⁾。

もしこの説が正しいならば、湯面とくにその周辺部の

動きをコントロールすることによつて、凝固組織のコントロールができるはずである。本研究においては、Al-0.2% Cu 合金を用い、各種の振動、攪拌をあたえて鑄塊をつくり、湯面周辺部の振動が鑄塊の凝固組織にきわめて大きな影響をあたえることを明らかにした。

さらにこのことは、当然、注湯時における湯面振動にもあてはまらなければならないと考えられるので、単に注湯するのみで、均質微細な凝固組織を有する鑄塊をうる方法を見出す目的で、注湯方法、注湯温度を種々かえて鑄塊をつくり、それらのマクロ組織の観察を行なつた。その結果、鑄壁近傍への注湯、あるいは、凝固殻そのものへの注湯が等軸晶領域の生成および組織の微細化に、きわめて効果的であることを明らかにした。

2. モデルによる振動および攪拌現象の動的観察

バイブレーター上にのせた、1000cc のビーカーに、120 mm の高さまで水を入れ、水面に黒インクを滴下し、上下に振幅 0.2 mm 振動数 50c/s の振動をあたえ、インクの動きを観察した。その結果の 1 例を Photo. 1

* 昭和44年3日金属学会講演大会にて発表

** 千葉工業大学 Ph. D
昭和44年6月23日受付

*** 千葉工業大学 大学院

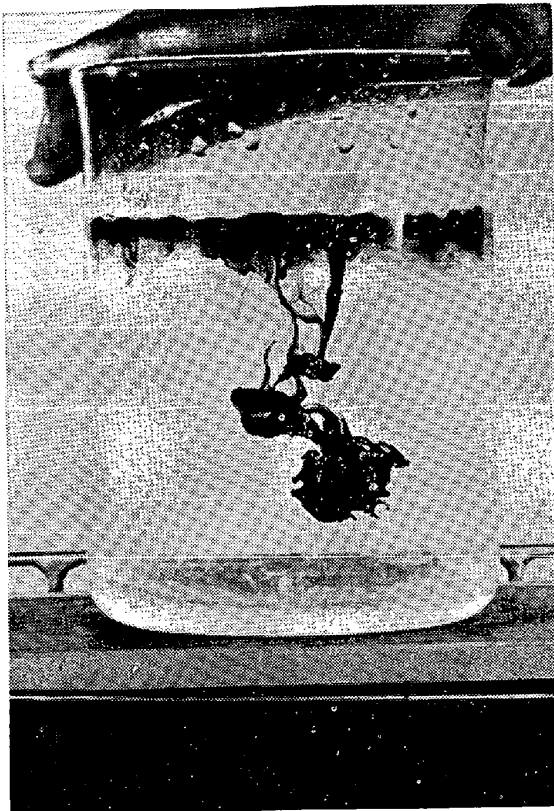


Photo. 1. Waves of the surface water in the vibrating beaker.

に示す。

水面の激しい波立ちにもかかわらず、内部のインクの動きはきわめてゆるやかで、ほとんど振動の影響をうけていないようにみうけられた。振幅をさらに 0.6 mm まで増大しても、水面の波動は大きくなつたが、この傾向はほとんど変わらなかつた。また、水面の波動は、水面に平行な振動をあたえた場合に比し、水面に垂直な方向にあたえた場合のほうがはげしかつた。これらの結果は、金属の凝固に際して振動をあたえても、それが効果的に微細化に働くのは、主として湯面近くにおいてであることを暗示するものと考えられる。

つぎに、1 000cc のビーカーに 120 mm の高さまで水を満し、外径 4 mm のガラス管を挿入し、空気を吹きこみ、その際も上と同様、水面から黒インクを滴下しその動きを観察した。

気泡の浮上の際に、水面には波が生じそれが周辺部に向かつて拡大していくのがみとめられた。水面の波立ちは、浮上する気泡の数をまずにつれてはげしくなり、水面全体が著しくゆれるのが観察されたが、内部では気泡の近傍にのみゆるやかな水の動きがみとめられた。このことは、鋳塊の凝固に際して放出されるガスも、溶湯中では、そのガスが浮上に際し通過する道すぢ近傍にのみ湯の動揺をひきおこし、それが湯面に達したとき、もつ

とも凝固界面の広い範囲にわたつて温度の繰返し変動をあたえやすいことを暗示するものと考えられる。

3. 鋳塊の凝固組織におよぼす振動および攪拌の影響

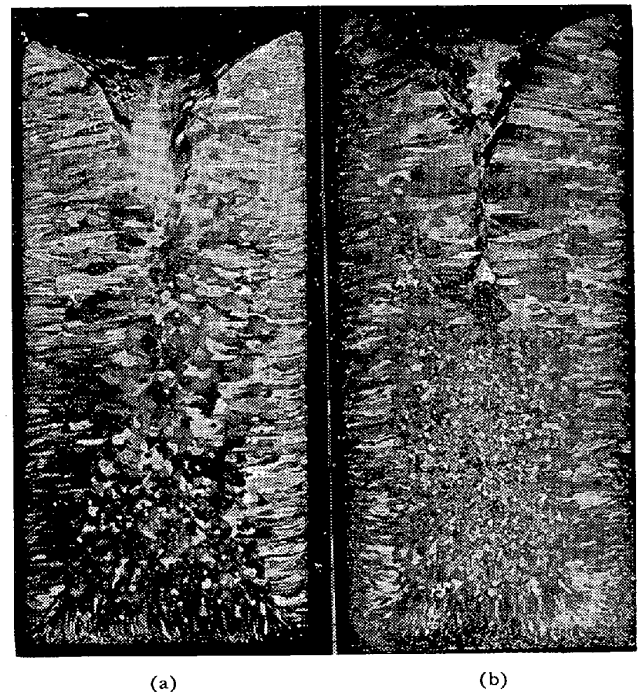
3.1 鋳型の振動

黒鉛坩堝を用い電気炉中で溶解せる Al-0.2% Cu 合金 1 200 g を、680°C から、内径 65 mm、深さ 150 mm、厚さ 10 mm の黒鉛鋳型に注湯し、静置凝固せしめて得られた鋳塊のマクロ組織は、Photo. 2 a に示すごとくで底部にわずかの粗大な等軸晶がみとめられたが、主として柱状にのびた結晶からなつていた。この際注湯後収縮パイプの生成終了まで約 1.5 min を要した。

同様にして溶解せる合金を注湯直後 10 sec のみ、上下に振幅 0.2 mm の振動をあたえた後、静置凝固せしめた場合は、Photo. 2 b に示すごとく、下半部に等軸晶領域が著しく拡大し、上半部には柱状晶が発達し、その柱状晶領域の中に、凝固初期に凝固殻前面にそつて結晶が沈澱したことを示すところの、微細な等軸晶が縦に帯状に存在した。

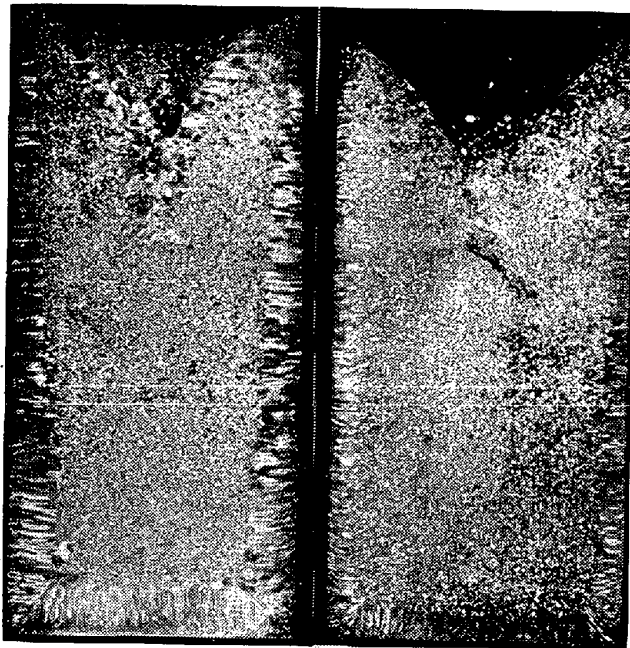
3.2 アルミナ管による攪拌

上と同様に上注ぎによつて注湯された溶湯中に、外径 6 mm のアルミナ管を挿入し、湯面中央より 20 mm お



a. Mold stationary.
b. Mold vibrated only for 10 seconds after pouring (about 1.5 minutes required for total solidification)

Photo. 2. Effect of the mold vibration on the macrostructures of Al-0.2%Cu alloy ingot. $\times 2/3(3/5)$



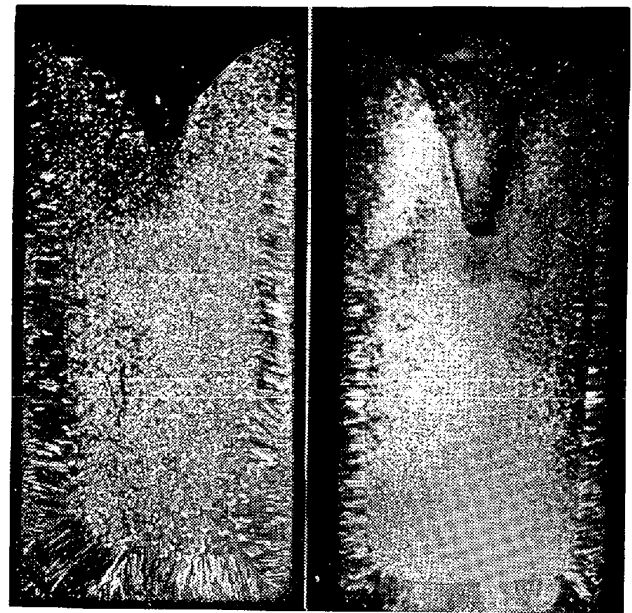
(a) (b)
 a. Molten surface was agitated only for 10 seconds after pouring.
 b. Entire-liquid metal was agitated only for 10 seconds after pouring.

Photo. 3. Effect of the agitation with an alumina tube, 6 mm dia., on the macrostructures of Al-0.2% Cu alloy ingot, poured at 680°C.

よび 100 mm の深さにそれぞれ挿入し、直径 40 mm の円をえがきつつ、0.7 回/sec の速さで注湯終了後 10sec 間のみ攪拌して得られた鋳塊の凝固組織は、Photo. 3 のごとく、ともに著しい微細化効果がみとめられた。そして湯面近くのみを攪拌しても、湯中深く管を挿入して攪拌しても鋳塊の組織に大差はみとめられなかつた。

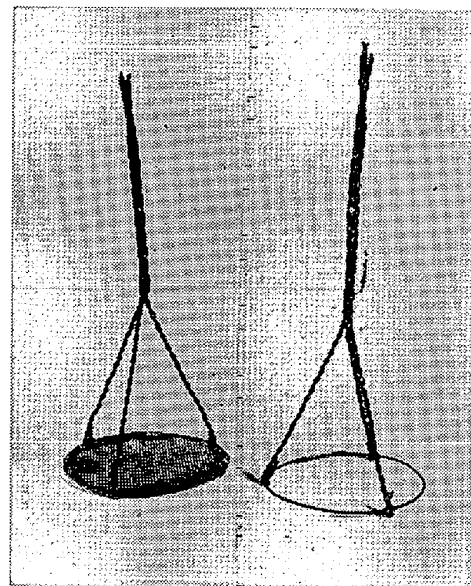
3.3 ガスによる攪拌

さきに、モデル実験によつて、ガス攪拌によつても、そのガスが湯面に浮上する際に、もつとも、湯が動きやすいことを知つたが、同様の傾向は、鋳塊の凝固においても存在するものと考え、このことをたしかめるために、上と同様に上注ぎによつて注湯された溶湯中に、外径 6 mm のアルミナ管を湯面中央より、20 mm、および 100 mm の深さにそれぞれ挿入し、窒素ガスを 2000 cc/min の割合で注湯完了後 10sec のみ吹きこんで得られた鋳塊の凝固組織には、Photo. 4 のごとく、ともに著しい微細化効果がみとめられた。底部近くまでアルミナ管を挿入した場合には、収縮パイプ近傍まで結晶が微細化され、等軸晶領域もさらにいく分拡大された。これは湯面近くにガスを吹きこんだときに比して、底部に吹きこんだほうが、ガスによる溶湯の冷却効果が大き、生成された結晶微粒子の再溶解による消滅が少なかつた



(a) (b)
 a. Bubbling at a depth of 20 mm.
 b. Bubbling at a depth of 100 mm.

Photo. 4. Effect of gas agitation (N₂ gas, 2 000 cc/min) on the macrostructure of Al-0.2%Cu alloy ingots.



(a) (b)
 a. Oscillator made of stainless steel gauze.
 b. Ring-type oscillator.

Photo. 5. Oscillators for molten surface vibration.

ためと考えられる。

3.4 金網およびリングによる湯面振動

30mesh のステンレス金網と直径 1.2 mm の鉄線リングで作れる Photo. 5 a のごとき、直径 45 mm の円板状振動子を、湯面に注湯後 10sec 間のみ接触せしめ、上下に振幅 0.2 mm, 50c/s の振動をあたえた。この際の注湯は底注ぎ法を用いた。すなわち、上と同様の大き

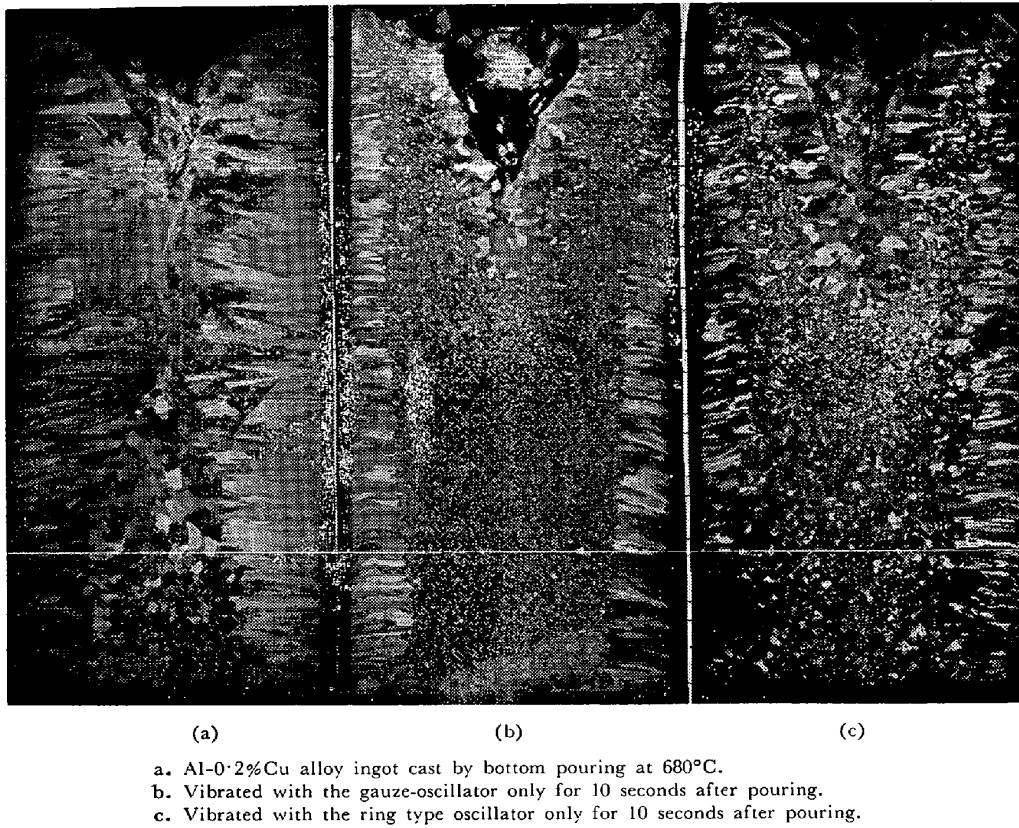


Photo. 6. Effect of surface vibration on the macrostructure of Al-0.2%Cu alloy ingots cast by bottom pouring at 680°C. $\times 2/3(2/3)$

さの黒鉛鋳型をイソライト煉瓦上におき、イソライト煉瓦につくつた直径 16 mm の孔より注湯し、溶湯面が金網またはリングに接触した後振動を開始した。この際得られた凝固組織を、静置凝固組織と比較して Photo. 6 a. b. に示した。すなわち静置凝固組織は殆んどが柱状晶からなり、きわめてわずかの等軸晶が底部に存在したが湯面を振動せしめたものは柱状晶に囲まれた微細な等軸晶の大きな領域があらわれた。

金網をのそぎ、Photo. 5 b のごとき、直径 45 mm の鉄線リングのみを用いて同様に振動をあたえて得られた組織は Photo. 6 c のごとくで、金網を用いて振動をあたえた場合とほぼ同様の傾向を示し、凝固の初期に、湯面外周部に波動を生じさせることが、結晶微細化にきわめて大きな影響をあたえることが知られた。

4. 鋳塊の凝固組織におよぼす注湯法の影響

4.1 底注ぎ法

Al-0.2% Cu 合金約 1 200 g を、黒鉛坩堝を用い、電気炉で溶解し、680°C および 700°C から Fig. 1 のごとき内径 65 mm、深さ 150 mm、厚さ 10 mm の黒鉛鋳型に、底部の直径 16 mm の孔をとおして底注ぎを行なった。湯面は静かに上昇し、波動は明りようにはみと

められず、得られた鋳塊は、Photo. 7 に示すごとく、ほとんどが柱状晶からなり、わずかに下部に粗大な等軸

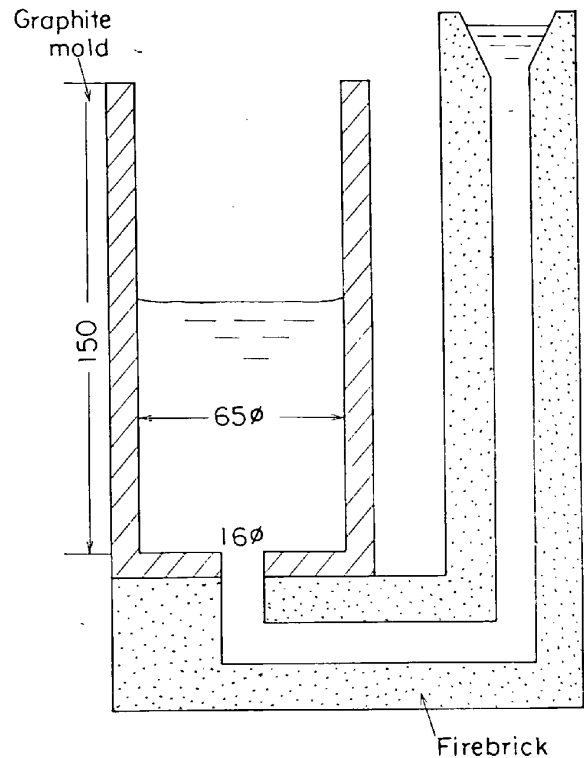
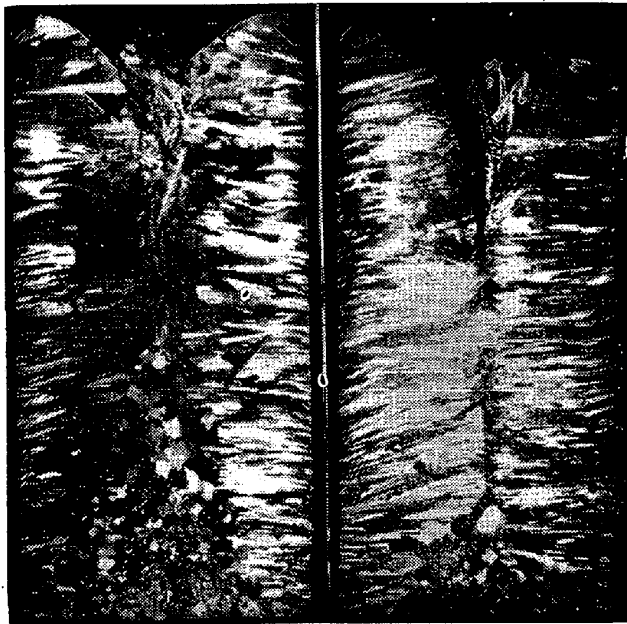


Fig. 1. Bottom pouring.



(a)

a. Poured at 680°C

(a)

b. Poured at 700°C

Photo. 7. Macrostructure of Al-0.2%Cu alloy ingots cast by bottom pouring.

×2/3(3/5)

晶が存在した。その等軸晶の領域は注湯温度 700°C の場合においては 680°C の場合に比して小さく、かつ等軸晶は粗大であった。

4.2 上注ぎ法

4.2.1 鑄型中央への注湯

Al-0.2% Cu 合金を 680°C および 700°C から、直径 16 mm の注湯口を有する黒鉛製ターンデッシュを用いて、Fig. 2 のごとく注湯を行なった。この際ターンデッシュは、あらかじめ約 450°C に予熱した。鑄型は内径 65 mm、深さ 150 mm、肉厚 10 mm の黒鉛鑄型で、その中央に注湯して得られた鑄塊の組織は、Photo. 8 のごとくであった。

すなわち、680°C から鑄型中央へ注湯せる場合は、鑄塊下部に、底注ぎによつて得られた鑄塊に比して、やや大きな等軸晶領域が存在し、その等軸晶も前者に比して微細であった。また 700°C から注湯せる鑄塊においては、等軸晶領域は小さくなり、わずかに数個の comet 状の結晶が底部に存在し、他はほとんど柱状晶のみからなっていた。

4.2.2 鑄壁近傍への注湯

上と同様のターンデッシュを用い、鑄型に対するターンデッシュの注湯口の位置を Fig. 3 のごとくずらし、注湯口の中心が鑄壁より約 10 mm はなれた位置にあるようにして、前と同様の溶湯を 680°C から注湯したときは、Photo. 9 a のごとき組織が得られた。すなわち、

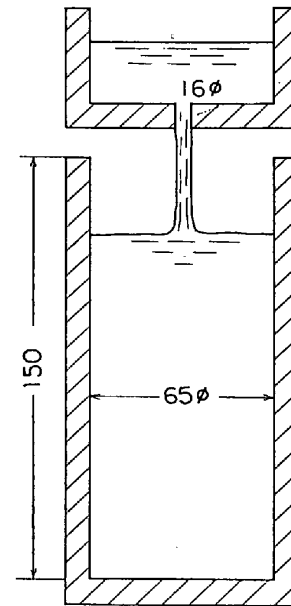
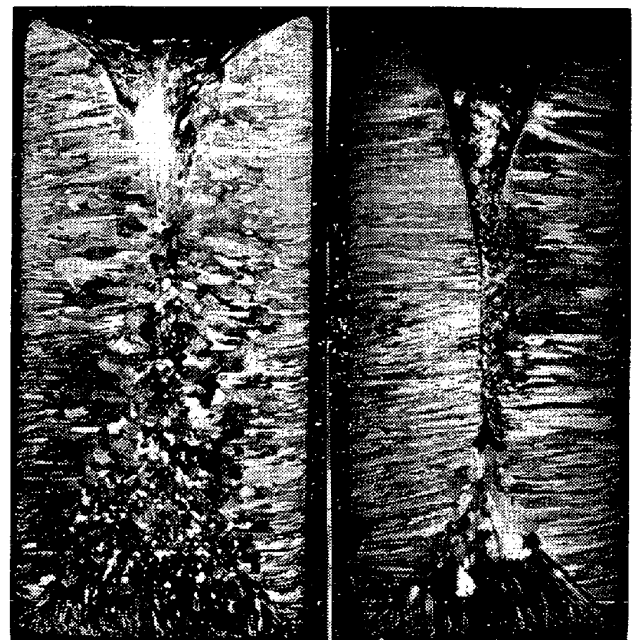


Fig. 2. Top pouring.



(a)

a. Poured at 680°C

(b)

b. Poured at 700°C

Photo. 8. Macrostructure of Al-0.2%Cu alloy ingots cast by top pouring. ×2/3(3/5)

鑄型内中央に注湯したときに比して、著しい等軸晶領域の拡大がみとめられた。700°C から注湯せる場合は、Photo. 9 b に示すごとく、680°C 注湯の場合に比して等軸晶の粗大化と、その領域の著しい縮小をみたが、鑄型中央へ同じ温度から注湯せる場合よりは、等軸晶はあきらかに微細化の傾向を示した。

さらに、ターンデッシュの底の注湯口の総断面積が、前と同様になるように、直径 6.5 mm の孔 6 個を、

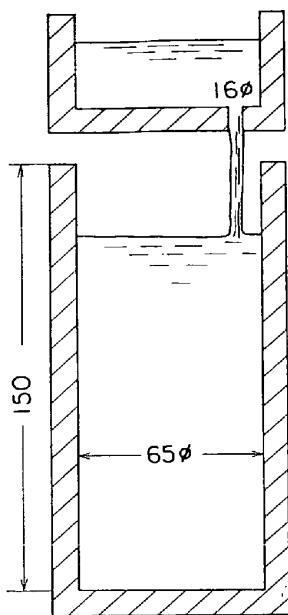


Fig. 3. Eccentric pouring.

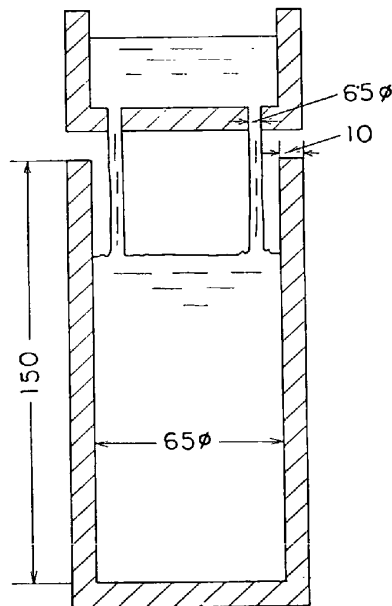
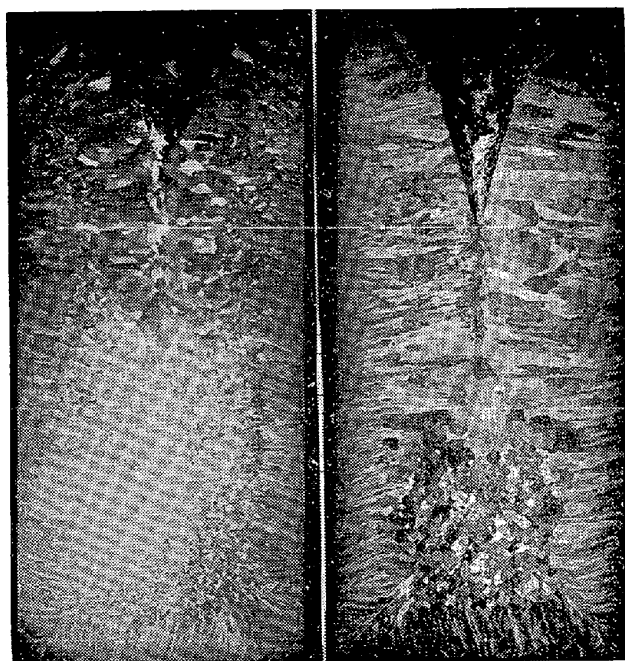
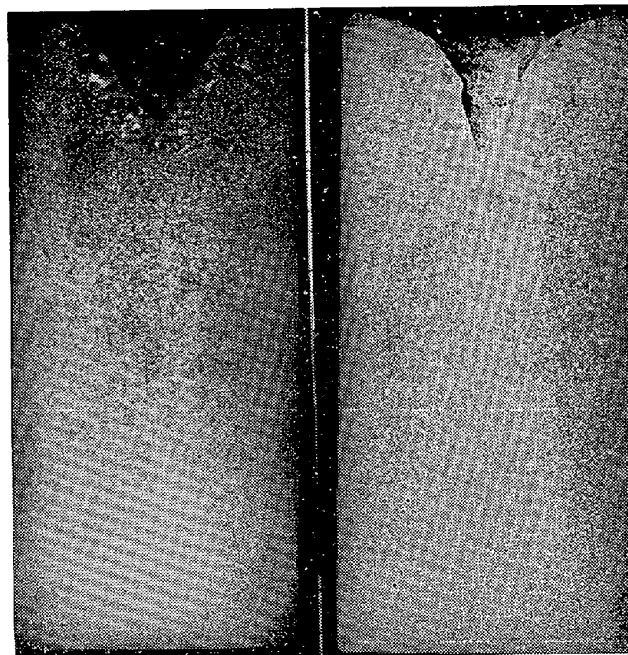


Fig. 4. Pencil-ring pouring.



(a) Poured at 680°C (b) Poured at 700°C

Photo. 9. Macrostructure of Al-0.2%Cu alloy ingots cast by eccentric pouring. $\times 2/3(3/5)$



(a) Poured at 680°C (b) Poured at 700°C

Photo. 10. Macrostructure of Al-0.2%Cu alloy ingots cast by pencil-ring pouring. $\times 2/3(3/5)$

直径 45 mm の円周上に等間隔に設け、Fig. 4のごとく鑄壁近傍に 680°C から注湯したとき、は鑄型中央への注湯に比してさらに湯面周辺部の波動がはげしくみとめられ得られた鑄塊の凝固組織は、Photo. 10 aのごとく、上部中央の収縮パイプの周囲にわずかに柱状晶が存在するのみで、ほとんどが微細な等軸晶からなり、著しい微細化の傾向を示した。700°Cから注湯した場合は、収縮

パイプ周辺の粗大晶の領域が若干拡大したが、前者と同様大半が微細な等軸晶からなつた。

しかしながら、鑄壁近傍に注湯するときは、注湯箇所付近の鑄肌縦に帯状の模様の生ずるのがみとめられた。

4.3 傾注法

上と同様の鑄型を、はじめ約 45° に傾斜せしめ、Fig.

5のごとく、680°C から注湯しつつ鑄型を直立させた場合の鑄塊の凝固組織は、Photo. 11 aのごとく、きわめて微細な等軸晶からなつた。最初の注湯個所に相当する矢印で示せる位置に、わずかに細長い柱状晶が斜め上

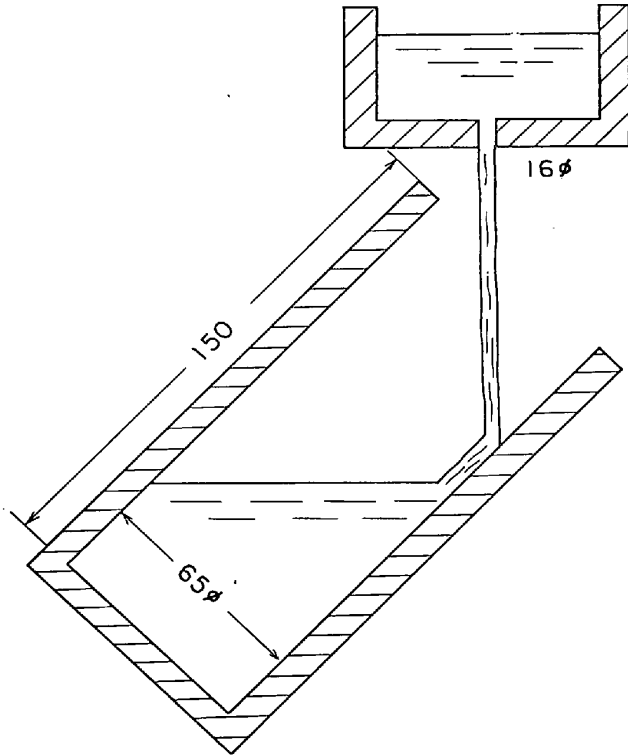


Fig. 5. Tilting-mold pouring.

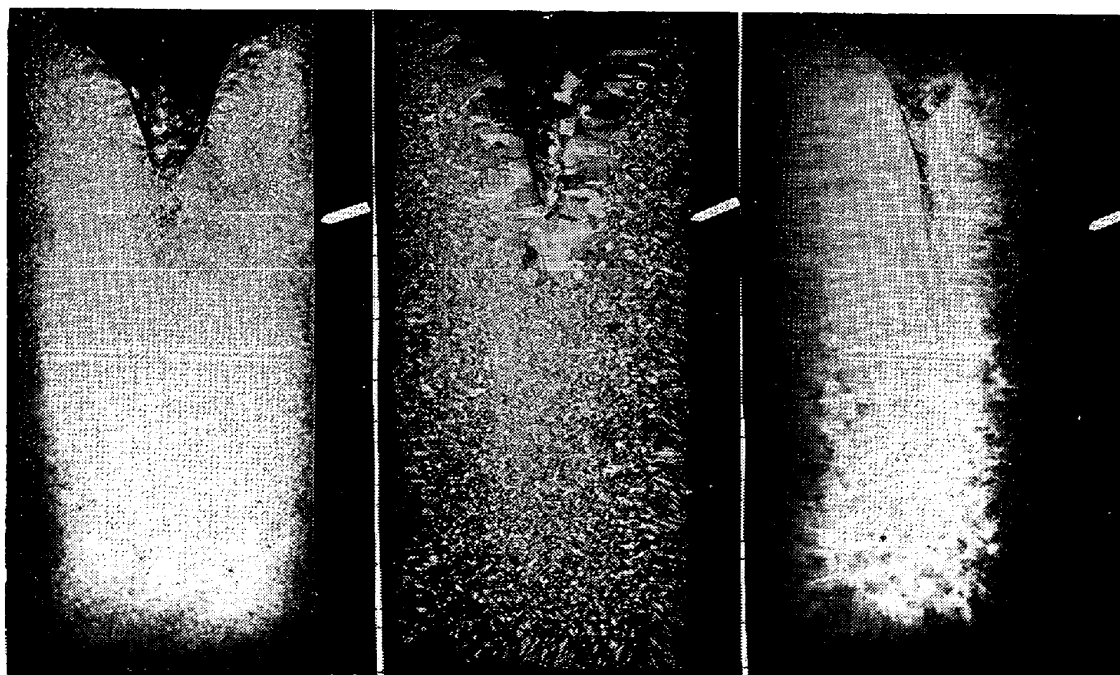
方に向かつて発達し、さらに、収縮パイプの周囲には柱状にのびた粗大晶の小さな領域が存在した。注湯温度が700°Cになると、Photo. 11 bのごとく、680°Cからの注湯でみとめられた最初の注湯個所における鑄壁からの柱状晶は消え、そのかわり、注湯個所以外の鑄壁面に柱状晶の帯状の領域があらわれた。等軸晶も若干粗大化し、また、収縮パイプの周囲には、柱状にのびた粗大な結晶の領域の拡大がみとめられた。

さらに、注湯温度をたかめ、750°Cから注湯した場合は、Photo. 11 cのごとく、等軸晶は著しく粗大化し、その領域は柱状晶に囲まれ、鑄塊下部に存在した。

5. 考 察

鑄型内において、もつとも溶湯が動きやすい場所は、Photo. 1に示すごとく自由表面で、以上の結果はいずれも、湯面の振動が鑄塊の凝固組織にきわめて大きな影響をあたえることを示すものと考えられる。

振動をあたえて均質微細な等軸晶のみからなる鑄塊をうるためには、鑄型全体または溶湯全体を振動または攪拌するような方法によるのではなく、湯面のしかも、凝固殻上端部が凝固の初期に振動をうけるようにすることが重要で、このためには湯面周辺部を上下に振動せしめることがもつとも効果的と考えられる。従来、大型鑄塊に対する振動、攪拌による凝固組織の改良は、そのためのエネルギー消費が大なために、ほとんど実用化される



(a)

a. Poured at 680°C

(b)

b. Poured at 700°C

(c)

c. Poured at 750°C

Photo. 11. Macrostructures of Al-0.2%Cu alloy ingots cast in tilting molds. $\times 2/3(2/3)$

に到らなかつたが、適当な形状の振動子によつて、湯面周辺部にしかも凝固の初期のみに振動をあたえることによつて、大形鑄塊の凝固組織のコントロールは可能になるものと考えられる。

同様のことは、注湯時の湯面の振動にも当然あてはまらなければならない。注湯法を異にしてつくれる鑄塊のマクロ組織は、注湯に際し、湯面とくに、その周辺部に波動を生ずるような場合、等軸晶の微細化、およびその領域の拡大が起こることを示した。すなわち、底注ぎの場合のごとく湯面が静かに上昇する場合は、注湯温度が低くても等軸晶は生成しにくく、これに反し、鑄壁近傍に注湯することによつて、湯面周辺部に波動を生じせしめた場合は、等軸晶の著しい微細化がみとめられた。その場合でも、注湯温度が高くなると、収縮パイプの周囲における、柱状にのびた粗大晶の領域が拡大するのがみとめられた。

これは等軸晶の核となるべき結晶微粒子が、凝固殻の結晶の幹や枝の溶断遊離によつて、凝固の初期においてのみ生成され Fig. 6a のごとく U 字型に沈澱堆積するために、中央上部に、核たるべき結晶微粒子を含まない上澄み液がのこり、そこに、最終段階において Fig. 6b のごとく、その周囲の結晶が成長したものと考えられる。

注湯温度が上昇するにつれて、溶解消滅をまぬがれて生き残る結晶微粒子の数が少なくなり、したがつて堆積する結晶の量が減じ、中央上部の核のない残湯の領域が拡大するために、パイプをとりまく柱状にのびた粗大晶の領域が拡大すると考えられる。

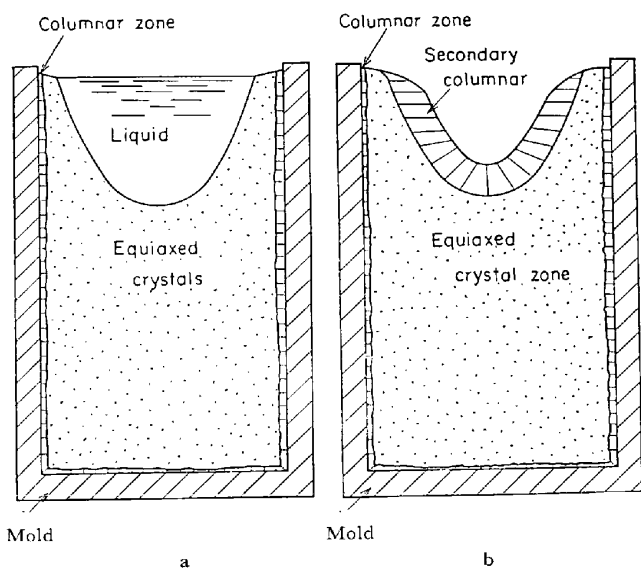


Fig. 6. Schematic illustration of the formation of the secondary columnar zone.

したがつて、鑄塊の組織を全体にわたつて均質微細にするためには、鑄型内全体に等軸晶が堆積しうるほどに、多数の結晶微粒子の生成と、それらの生存を許し、中央上部に結晶微粒子のない上澄み液を残さないよう注湯温度をできるだけ低くしなければならないと考えられる。

680°C から傾注法によつて得られた鑄塊において、Photo. 11a のごとく、最初の注湯位置に、斜めに成長した細かい柱状晶の領域がみとめられた。これは溶湯の温度が低く、溶湯が鑄型に最初に接触した瞬間に、Fig. 7 のごとく凝固殻を局部的に生成し、その前面の樹枝状晶の枝は後続の溶湯によつて溶断、成長、溶断を繰り返し、生成された結晶微粒子が、溶湯中に浮遊したまま鑄型底部に流下するために、鑄型壁の他の場所における凝固殻の成長が阻止されたためと考えられる。

同様の現象は、上注ぎ法によつて溶湯が鑄型底部に最初に接触した個所にも当然起こると考えられる。Photo. 12 は、Al-0.06% Ti 合金を 670°C より、内径 35 mm 深さ 100 mm の黒鉛鑄型に注湯して得られた鑄塊のマクロ組織で、最初に溶湯が接触したと考えられる。底部中央に柱状晶が扇形に発達しその両側の柱状晶は等軸晶の堆積によつて成長を阻止されている。これは、上の傾注法の場合と同様に、まず鑄型に最初に接した個所に瞬間的に柱状晶が生成し、後続の湯でその樹枝状晶の枝が溶断し結晶微粒子が周囲に押し流されたため、この最初に形成された扇状柱状晶はやがて溶湯中に沈み、結晶微粒子の生成源の役をしなくなつたものと考えられる。

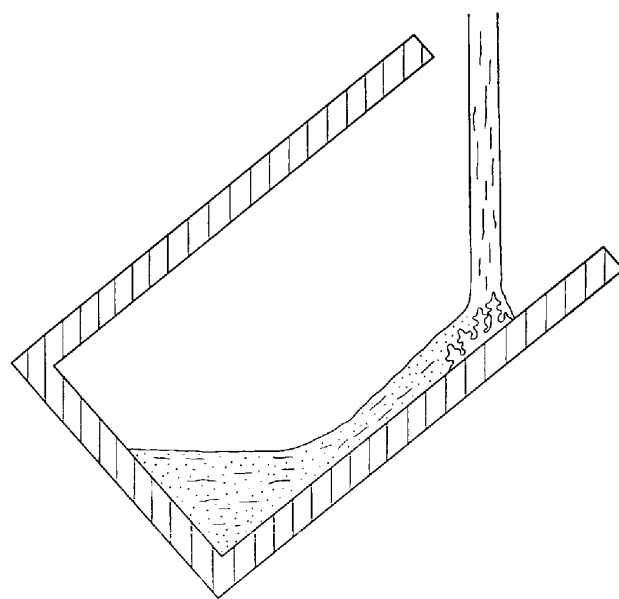


Fig. 7. Schematic illustration of dendrite remelting in a tilting mold.

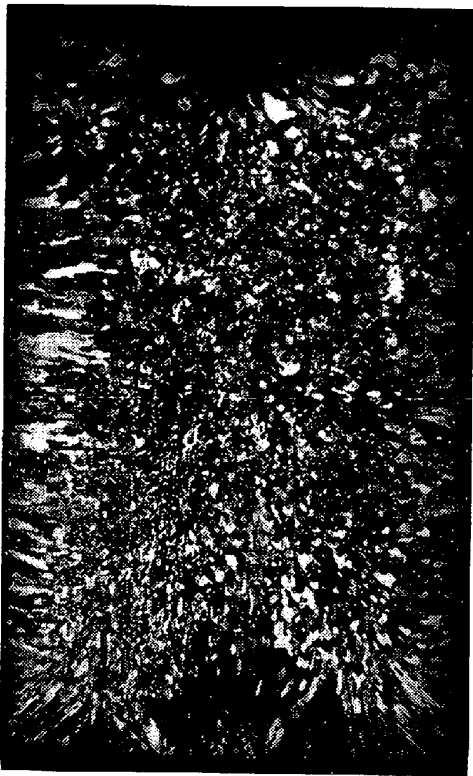


Photo. 12. Macrostructure of Al-0.06%Ti alloy ingot cast at 670°C.

700°C において傾注法によつて注湯を行なつたときは、Photo. 11 bのごとく、はじめの注湯位置を残して、鑄壁からの柱状晶の発達をみたが、注湯温度が高かいために、初めの注湯位置における凝固殻の成長発達はさまざまげられ、生成された結晶微粒子のうち、溶解消滅をまぬがれたものの数は、680°Cでの注湯の場合に比して少くないために、鑄壁の他の部分からの柱状晶の成長を阻止できなかつたと考えられる。

この傾向は、750°C においてはさらに明りようになり、溶解をまぬがれて生き残つた結晶微粒子の数が極度に少くなり、Photo. 11 cのごとく、大きな柱状晶領域に囲まれたわずかの粗大晶がみとめられた。

微細な等軸晶のみからなる鑄塊をうるためには、凝固殻上端の凝固界面が温度の繰り返し変動をうけるような注湯法、すなわち、多くの注湯口を用い鑄壁近くに注湯する方法が効果的と考えられる。しかしながら、多くの注湯口を用いて注湯することは、それだけ、湯の酸化、酸化膜の巻きこみの機会を多くし、さらに注湯口の径が小さくなると、注湯温度の低下にともない、注湯が困難

になるおそれがあり、また、鑄壁近くに注湯することは、鑄肌縦の縞模様を生成しやすい欠点が存在する。

また低温での傾注法も、組織の微細化のためには効果的であるが、鑄塊内の最初の注湯位置に他と異なつた組織を生じやすく、均質鑄塊をうるには適当でなく、また鑄肌縦の縞模様を生じやすい欠点が存在する。

したがつて、理想的な注湯法は、できるだけ低温で、鑄型内に注湯し、かつ結晶微粒子を無数に生成しうるものでなければならないと考えられる。

6. 結 言

ビーカー中の水にインクを滴下し、これに各種の振動攪拌をあたえ、インクの動きを観察し、湯面がもつとも波動を生じやすいことを明らかにし、同様の振動、攪拌をあたえて、Al-0.2% Cu 合金鑄塊をつくり、湯面とくにその周辺部の振動によつて、凝固組織がコントロールできることを明らかにした。

さらに、Al-0.2% Cu 合金を用い、黒鉛鑄型に、底注ぎ、上注ぎ、および傾斜注ぎによつて注湯を行ない、鑄塊の凝固組織と注湯方法の関係をしらべた。その結果、凝固殻上端部が温度のはげしい変動をうけやすい注湯法、すなわち、上注ぎ法による鑄壁近傍、ならびに傾注法が、組織の微細化効果の大なこと、できるだけ低い温度で注湯することが重要なことを明らかにした。

文 献

- 1) J. B. JONES: Af Tech Report, No 6675 W. A. D. C. (1951)
- 2) W. ROSTOKER and M. J. BERGER: Foundry 81, (1953), p. 100
- 3) R. S. RICHARDS and W. ROSTOKER: A. S. M. Trans 48 (1956), p. 884
- 4) Y. B. GUREVICH et al., Stal, 17 (1957), p. 406
- 5) N. P. NICHOLAICHIK and E. N. NICHOLAICHIK: Stal, 17 (1957), p. 322
- 6) G. SCHMID and A. ROH: Z. Electro-Chemie, 45 (1939), p. 796
- 7) G. SCHMID and A. ROH: Metal Industry 60 (1942), 15, p. 252
- 8) A. H. FREEDMAN: A. F. S. Trans, 65 (1957), p. 578
- 9) R. G. GARLICK et al., A. F. S. Trans, 67 (1959), p. 366
- 10) 大野, 早田: 鉄と鋼, 55 (1969), 6, p. 475