研究論文

加熱鋳型式連続鋳造法によって得られた
Al-Cu 合金鋳塊の組織と機械的性質*

本保元次郎**・大野 篤美**

Mechanical properties and structures of Al-Cu alloys produced by
Heated Mold Continuous Casting Method (OCC)*

Genjiro MOTOYASU** and Atsumi OHNO**

Al-1 to 50 mass% Cu alloy billets were cast by the horizontal heated mold continuous casting method (OCC) developed by the authors. The surface condition, macrostructures and mechanical properties of the billets were examined and compared with those of the billets produced by a conventional method. The OCC billet has a flat mirror-like surface having the surface roughness value 1/10 of that of the usual billets. It is constituted macroscopically of an unidirectionally solidified single crystal seemingly and microscopically of aligned primary and eutectic phases. Mechanical properties of the OCC billet such as tensile strength, hardness and bending fatigue life are superior to those of conventional billets. Wrought products rolled, drawn and bent from the OCC billet are free from such defects as edge cracking, peeling and surface cracking.

Keywords: continuous casting, Al-Cu alloys, unidirectional solidification, mechanical properties, workability

(Received July 5, 1988)

1. 緒 言

近年、著者の一人により開発された加熱鋳型式連続鋳造法 OCC プロセス¹⁾は、鋳型内壁面の温度を鋳造金属の凝固温度以上に加熱保持し、凝固のための抜熱は鋳型の外で行うという独特の方法である。本法により得られた鋳塊は、光沢表面を持つ一方向凝固組織鋳塊であり、圧延加工性や線引き加工性が、従来から行われている普通の鋳造法で得られたものより数段すぐれていることが報告されている^{2)~5)}。

本研究では、一般に展伸用や鋳物用合金の基本合金としてよく知られている Al-Cu 二元系合金に着目し、水平式 OCC 連続鋳造装置⁴⁾により種々の組成の Al-Cu 合金の小径の鋳塊を作製した。そして各鋳塊の表面状態、鋳塊組織、機械的性質、塑性加工性について調べ、さらに普通の金型鋳造法で得られた鋳塊と比較検討した。

2. 実験方法

実験に用いた試料は、凝固終了時に α 相単相となる Al-1.0, 4.0% Cu 合金、亜共晶組成の Al-10, 20% Cu 合金、共晶組成の Al-33% Cu 合金および過共晶組成の Al-40, 50% Cu 合金であった。

OCC 法による鋳塊（以下この鋳塊を OCC 鋳塊と呼ぶ）の作製に用いた装置は、さきに Zn-Al 合金鋳塊の作製に用いたのと同じ水平式 OCC 連続鋳造装置を使用した。この装置により、直径 6 mm、長さ 10 m の鋳塊を、250 mm/min の鋳造速度で連続鋳造した。このときの鋳造条件は、試料の組成により異なり、溶湯温度は各試料の液相線温度以上 50~90°C、鋳型温度は液相線温度以上 20~70°C であった。

OCC 鋳塊と普通の金型鋳造法で得られた鋳塊を比較するために、OCC 鋳塊と同じ組成の合金を黒鉛のつぼを用いて溶解し、200°C に予熱した鋳鉄製水平金型に、

* 軽金属学会第74回春期大会（昭和63年5月）で一部発表。

** 千葉工業大学金属工学科（習志野市）。Department of Metallurgical Engineering, Chiba Institute of Technology (Narashino-shi, Chiba).

液相線温度以上100°Cより注湯して、直径6 mm、長さ200 mmの鋳塊（以下この鋳塊を普通鋳塊と呼ぶ）を得た。

得られた鋳塊の表面状態および鋳造組織を観察すると同時に、それらの機械的性質、塑性加工性を調べた。

鋳塊の表面状態は肉眼で観察すると共に、光輝度およびあらさを測定した。光輝度の測定は、中村ら⁶⁾および石神ら⁷⁾が鋼材およびステンレスの光輝性の測定に用いた方法を適用した。また、表面あらさはJISB0601にもとづいて、触針式あらさ計で測定し、最大高さ R_{max} で表示した。

鋳塊の表面および断面のマクロ組織を観察した。鋳塊断面のミクロ組織の観察にはEPMAを用いた。なお、OCC鋳塊については鋳造開始端から500 mmの位置の組織を観察した。

鋳塊の機械的性質を知るために、引張試験、抗折試験および硬さ試験を行った。引張試験は、各組成の鋳塊を長さ150 mmに切断しそれらを引張試験片とし、標点間距離50 mm、ひずみ速度2 mm/minの条件で、各試料7本ずつについて行った。抗折試験は、引張試験と同様の試験片を用い、支点間距離100 mm、ひずみ速度2 mm/minの条件で、圧縮試験機を使用して行った。硬さ試験は、ビッカース微小硬度計を用い、荷重25 gf、保持時間15 sの条件で行った。

鋳塊の塑性加工性を調べるためには、180度曲げ、90度繰り返し曲げ、圧延および線引き加工を行った。なお、加工試験には、直径6 mm、長さ200 mmの鋳塊を試験片として使用した。Fig. 1の(a)は180度曲げ、(b)は90度繰り返し曲げ加工試験の方法を示したものである。180度曲げ加工は、試験片を押し棒により180度押し曲げた。そしてわん曲部の表面状態の変化を観察した。90度

繰り返し曲げ加工は、試験片の一端を型に固定し、他端を型に沿って90度折り曲げ、次に元のまっすぐな状態にもどした。そしてこの操作を試験片が破断するまで繰り返した。このときの曲げ回数と破断部付近の硬さを測定した。圧延加工は、直径6 mmの試験片を室温において厚さ0.5 mmの薄板になるまで、毎回約6%の断面減少率で行った。また、得られた薄板の耳割れの発生状態を調べ、圧延加工性の良否を判断した。線引き加工性を知るために、試験片を直径1 mmになるまで毎回約4%の断面減少率で線引き加工した。そして線引き後の試料の表面状態を観察した。

3. 結果および考察

3.1 鋳塊の表面状態

Fig. 2は、OCC鋳塊および普通鋳塊の表面状態の代表例を示したものである。本実験では、すべてのOCC鋳塊の表面が、合金組成に関係なく鏡面状の平滑表面であった。普通鋳塊は、組成が変わることにより若干の変化が見られたが、どの鋳塊も凹凸が存在し、鏡面にも平

Fig. 1 Schematic illustration of bending testers.
(a) Single bending, (b) Cyclic bending

Fig. 2 Surface appearances of Al-Cu alloy billets.

(a) Al-4.0%Cu, (b) Al-20%Cu, (c) Al-33%Cu, (d) Al-40%Cu.

滑にもならなかった。また、Table 1 に、鋳塊表面の光輝度およびあらさを示した。光輝度の測定結果は、クロムめっき板の光輝度を100%とした場合、普通鋳塊は68~86%で低い値であったのに対し、OCC 鋳塊は95~109%で非常に高い値であった。あらさは、OCC 鋳塊は0.3~2.9 R_{max} で普通鋳塊の約1/10以下と小さく、光輝度とよい対応を示した。

このように OCC 鋳塊の表面状態が良好なのは、鋳型温度が鋳造金属の凝固温度以上であるために、鋳塊表面が鋳型から出た時点ではまだ凝固せず薄い液膜に覆われ

た状態であり、その後鋳型と接することなく表面の液膜が自由凝固したためによるものと考えられる。また普通鋳塊では、鋳壁面に吸着しているガスによる影響や湯じ

Table 1 Surface brightness and roughness of Al-Cu alloy billets

Compositions	Casting method*	Surface brightness (%)	Surface roughness ($\mu m R_{max}$)
Al-1.0%Cu	OCC Process	108.1	1.4
	Conventional	79.1	15.2
Al-4.0%Cu	OCC Process	95.6	2.1
	Conventional	58.3	25.1
Al-10%Cu	OCC Process	97.1	2.9
	Conventional	68.0	22.3
Al-20%Cu	OCC Process	97.8	2.0
	Conventional	71.4	15.6
Al-33%Cu	OCC Process	109.8	0.3
	Conventional	82.9	6.2
Al-40%Cu	OCC Process	99.2	1.7
	Conventional	86.3	12.4
Al-50%Cu	OCC Process	101.4	1.5
	Conventional	77.7	20.3

*OCC Process: Heated mold continuous casting process developed by the authors.

Fig. 4 Macrostructures on transverse section of Al-Cu alloy billets. (a) Al-4.0%Cu, (b) Al-20%Cu, (c) Al-33%Cu, (d) Al-40%Cu

Fig. 3 Surface macrostructures of Al-Cu alloy billets.

(a) Al-4.0%Cu, (b) Al-20%Cu, (c) Al-33%Cu, (d) Al-40%Cu.

わの形成などにより、平滑にならなかったものと思われる。

3.2 鋳塊組織

Fig. 3 は、鋳塊の表面のマクロ組織の代表例を、また Fig. 4 は、それらの円断面のマクロ組織を示したもので

ある。OCC 鋳塊は鋳造開始端から500 mm 以上の位置では、どの組成の合金でもマクロ的な凝固粒界のない単結晶組織であった。普通鋳塊は、Al-4.0%Cu, Al-20%Cu および Al-40%Cu 合金鋳塊では等軸晶が認められ、Al-33%Cu 合金鋳塊では鋳塊表面から中心に向かう柱

Fig. 5 Microstructures on longitudinal and transverse section of Al-Cu alloy billets. (a) Al-1.0%Cu, (b) Al-4.0%Cu, (c) Al-10%Cu, (d) Al-20%Cu, (e) Al-33%Cu, (f) Al-40%Cu, (g) Al-50%Cu.

状晶が認められた。

このように OCC 鋳塊が単結晶組織になった理由は、鋳型面の温度を鋳造金属の凝固温度以上に保持することにより、鋳型面からの結晶の生成を阻止し、凝固のための放熱は鋳型直外において鋳塊を冷却して行ったためによるものと思われる。すなわち凝固は鋳塊ダミーと接する鋳塊の始端で開始され、その後一方向凝固が進行する。そして凝固が進行するにつれ、結晶の競争成長がおこり結晶粒数は減少し、容易に単結晶組織になったものと考えられる。これに対して普通鋳塊は、鋳壁の温度が凝固温度より低いために、鋳型面上で多数の結晶が生成し等軸晶や鋳塊表面から中心に向かう柱状晶を形成したものと考えられる。

Fig. 5 に、鋳塊の長さ方向の断面およびそれらの横断面のマイクロ組織を示した。OCC 鋳塊のマイクロ組織は、すべて一方向凝固組織であることが見出された。すなわち、Al-1.0, 4.0%Cu 合金では、 α Al のセラーデンドライトが鋳造方向と平行に伸びていた。Al-10, 20%Cu 合金では、初晶の α Al のデンドライトが連続して伸び、その間隙は共晶組織であった。Al-33%Cu 合金では、セル状の共晶組織が一方向に伸びていた。さらに Al-40, 50%Cu 合金では、デンドライト状および角柱状の初晶 CuAl_2 が連続して伸び、その間隙は共晶組織であった。そしてこれらの組織には、鋳造方向において初晶の偏在が見られず、均一であることが知られた。これは OCC プロセスでは、常に同一組成の溶湯を鋳型に供給し、それを一定の凝固速度で連続鋳造していることと、鋳造中に鋳壁面からの結晶の生成がないために、凝固開始端で生成した初晶又は共晶が、凝固の進行に伴い成長競争を行いつつ連続的に一方向に成長できたものと考えられる。

これに対して普通鋳塊は、組織に方向性はなく初晶の偏在や不均一な共晶組織が観察された。これは一般によく知られるように鋳型内での凝固が必ずしも一様に進行しなかったためと考えられる。

3.3 機械的性質

3.3.1 引張強さ、硬さおよび抗折値

Fig. 6 に、鋳塊の引張強さ、伸び、硬さおよび抗折強さを、また、Fig. 7 には Al-1.0, 4.0%Cu 合金鋳塊の引張試験後の破断状態を示した。OCC 鋳塊は普通鋳塊より総体的に、引張強さ、硬さおよび抗折強さが高い値であった。これは Fig. 5 に見られたように、OCC 鋳塊のマイクロ組織が細かったことと、引張方向が一方向凝固組織に対して平行であったためによるものと考えられる。しかしながら伸びについては普通鋳塊が高い値であった。これは Fig. 7 に示したように、普通鋳塊は表面

Fig. 6 Effect of Cu content on tensile strength, elongation, hardness and bending strength of Al-Cu alloy billets.

Fig. 7 Surface appearances of ruptured specimens. (a) Al-1.0%Cu, (b) Al-4.0%Cu.

に凹凸を生じながら全体的に伸びていたのに対し、OCC 鋳塊は一部分が大きくくびれ完全延性破断に近い状態で破断した。このために、全体伸びは低くなったものと思われる。

3.3.2 塑性加工性

180度曲げおよび90度繰返し曲げ加工が行えた試料は、Al-1.0および4.0%Cu 合金だけで、これら以外の試料は加工中に破断してしまった。

Fig. 8 は、180度曲げ加工後の試料の表面状態を示したものである。OCC 鋳塊は平滑面であるのに対し、普通鋳塊は大きな凹凸が観察された。このような表面状態の差が現れたのは次のように考えられる。普通鋳塊は多結晶鋳塊であり、各結晶粒のすべり面方向はかならずしも一致してはいない。このすべり面方向の差は、各結晶粒の変形方向の違いに現れ、それが表面の凹凸の発生につながったと考えられる。これに対し、OCC 鋳塊は単結晶鋳塊であるために、一様に変形し、表面が平滑であったと思われる。

Fig. 9 に、90度繰返し曲げ加工による破断までの曲げ回数と破断部分の硬さを示した。普通鋳塊は、Al-1.0%Cu 合金は8回、Al-4.0%Cu 合金は3回の曲げ回数で破断し、破断部分の硬さはHV 85および94であったのに対し、OCC 鋳塊は、それぞれ曲げ回数が19回お

よび8回で普通鋳塊の約2.5倍と多く、硬さはHV 98および113で高い値を示した。これは、普通鋳塊は多結晶鋳塊であるためにマクロ的な凝固粒界が存在し、その部分は不純物や欠陥が集中している。このような粒界に応力がかかるとクラックが発生しやすく、これが曲げ破断に影響したと考えられる。しかしOCC 鋳塊では、このような粒界がないためにクラックが発生しにくかったものと考えられる。またOCC 鋳塊は普通鋳塊の約2.5倍の曲げ加工を施されているために、加工硬化がすすみ、硬さが高くなったものと思われる。

圧延加工と線引き加工を行った結果、Cu の含有量の多い合金では加工中に破断してしまい、薄板および線材を作製することは不可能であった。つまり、直径6mmの鋳塊から厚さ0.5mmの薄板まで圧延加工できたのは、Al-1.0, 4.0%Cu 合金だけであった。また、直径1mm

Fig. 8 Surface appearances of bended specimens. (a) Al-1.0%Cu, (b) Al-4.0%Cu.

Fig. 9 Effect of bending cycles on hardness.

Fig. 10 Surface appearances of rolled specimens 0.5 mm in thickness. (a) Al-1.0%Cu, (b) Al-4.0%Cu.

Fig. 11 Surface appearances of drawn specimens 1 mm in diameter: Al-1.0%Cu alloy.

の線材がえられたのは Al-1.0%Cu 合金だけであった。
Fig. 10に薄板の表面状態を, **Fig. 11**に線材の表面状態を示した。普通鋳塊から得られた薄板は, 耳部分が蛇行したり, 割れなどの欠陥が発生し, 健全なものはまったくなかった。そしてその線材の表面は, 線引き用ダイスに起因したと見られる引っ掻き傷以外に, 多くの凹凸などの欠陥が観察された。これに対し OCC 鋳塊から得られた薄板は, 耳割れなどの欠陥の発生がまったく見られず, すべて健全なものであった。またその線材の表面は, ダイス傷が観察されただけで, この傷を除けば欠陥は存在せず, 平滑であった。このような表面状態の大きな差は, 素材として用いた鋳塊が単結晶鋳塊であるか又は多結晶鋳塊であるかの違いにより生じたと考えられる。

4. 結 言

水平式 OCC 連続鋳造装置により, Al-1.0~50%Cu 合金の丸棒鋳塊を作製して, 普通鋳造法による鋳塊と表面状態, 鋳塊組織および機械的性質について比較検討した。その結果次のことが明らかとなった。

(1) すべての OCC 鋳塊の表面は, 非常に高い光輝度を示す鏡面であり, そのあらさは金型鋳造した普通鋳塊

の1/10以下で, きわめて優れた平滑面であった。

(2) OCC 鋳塊は, 容易にマクロ的な単結晶となり, そのマイクロ組織は初晶や共晶が一方向的に整列する一方向凝固組織であった。

(3) OCC 鋳塊の引張強さ, 硬さおよび抗折強さは, 普通鋳塊のそれらにくらべ総体的に高い値を示した。

(4) 両方の鋳塊に, 曲げ, 圧延および線引き加工を施した場合, 普通鋳塊では凹凸や耳割れなどの欠陥が発生し, 健全なものがまったく得られなかったのに対し, OCC 鋳塊では欠陥が発生せず, すべて健全なものであった。

参 考 文 献

- 1) 大野: 特許第1049146号.
- 2) 大野: 日本金属学会報, **23** (1984), 773.
- 3) A. Ohno: *Journal of Metals*, **38** (1986), 14.
- 4) 本保, 茂木, 大野: 日本金属学会誌, **51** (1987), 935.
- 5) 本保, 大野, 茂木: 鋳物, **59** (1987), 670.
- 6) 中村, 山中, 網沢: 大阪府立工業奨励館報告, **53** (1971), 43.
- 7) 石神, 網沢, 山中: 日本金属学会誌, **43** (1979), 392.