6063 合金全羽毛状晶鑄塊の溶製と押出しへの利用

穴 田 博* 多 々 静 夫**

はじめに

アルミニウムとその合金鑄塊溶製に堅型半連続鑄造(DC 鑄造)が取り入れられるようになってから、粒状晶および柱状晶とは明らかに区別できる羽毛状晶と呼ばれる特異なマクロ組織が顕著に観察されるようになった。この名称は外観の組織形状に由来するが、結晶学的には双晶境界を間に挟む板状結晶の集合体であることにより成長双晶とも呼ばれている。1940 年代からその結晶学的な研究、発生のための凝固、鑄造条件或いは生成機構等についての研究がなされてきた⁽¹⁾⁻⁽¹⁹⁾。

加工用アルミニウム鑄塊としては、一般に微細で均一な粒状晶を持つものが機械的および表面的にも均一な品質を有するとして好まれ、希に発生する羽毛状晶、粒状晶の混在鑄塊は一般に加工性の低下、加工後の表面模様や集合組織のバラツキを有するなどの欠点があると指摘⁽²⁰⁾されている。しかし羽毛状晶の加工性に関しては、初期の頃より様々な意見があった。例えば Walter ら⁽²¹⁾、Eady ら⁽²²⁾は鑄塊軸方向への引張りにおいて粒状晶にくらべて極めて大きな伸びが得られるとし、また Aust ら⁽²³⁾は羽毛状晶鑄塊に 90% 以上の圧延加工を行うときは粒状晶と変わらない均一な圧延材の集合組織となることを、X 線背面反射法で確認している。Baumgarten⁽²⁴⁾は 95% 圧延でも鑄造集合組織が残るとし、本間⁽²⁵⁾も同じく圧延加工において鑄造組織は加工後も残存す

る傾向が強く、加工材の強度の均一性に欠けるとし、工業的に意義がないと述べている。

一方、時沢ら⁽²⁶⁾⁻⁽²⁹⁾は羽毛状晶鑄塊から切り出した小試験片により、引張り、圧縮、押出しなどの加工性についての基礎実験を行った。その結果、羽毛状晶の成長方向と平行に加工すれば粒状晶試料に比べ約 3 倍の伸び、圧縮や押出し加工では変形抵抗が低下するなどの勝れた加工性を示し、押出し材では機械的性質も変わらないことを報告している。そこで全羽毛状晶ビレットさえ溶製できれば、これを押出し用に供することで省エネルギー、生産性の向上が期待されと考え、現場実験を計画実行し予想通りの良好な結果を得ることができた⁽³⁰⁾⁻⁽³²⁾。

ここでは、全部羽毛状晶からなる 155 mm ビレットの現場鑄造の方策、またこれを用いて行った押出し試験結果を紹介する。

全羽毛状晶鑄塊の溶製方法

堅型半連続鑄造においては、Roth らはフロートを用いて溶湯を静注すること、溶湯温度を高めること、外部冷却効果を大きくすることにより羽毛状晶が発生しやすいことを定性的に述べている⁽³³⁾。現場鑄造にさきだち、実験的な試作機で鑄型やフロートについて検討し⁽³⁴⁾、この後、口径 155 mm の 6063 合金全羽毛状晶ビレットの溶製に移った⁽³⁰⁾。

図 1 は用いた鑄型およびフロート形状を示す。また鑄型より 270 mm に水槽水面がある。鑄型は上部を断熱材、下部を純銅製としている。フロート位置を高くし溶湯溜めを大きくし、熱損を少なくまた安定した熱流を得ようとした。また鑄型継ぎ目位置から凝固界面がのびる効果がある。従ってこの継ぎ目位置を下げるほど 2 次冷却効果を高め、一方向凝固法に近い凝固界面形状を得る事も可能であるが、十

* 富山大学講師；工学部

** 富山大学教授；工学部

Casting and Application to Extruding of 6063 Alloy DC Billets having Complete Feathery Crystals ; Hiroshi Anada, Shizuo Tada (Faculty of Eng., Toyama Univ., Toyama)

Keywords: feathery crystal, granular crystal, direct chill casting billets, solidifying rate, temperature gradient, extruding property, (111) Pole figure

1988 年 7 月 9 日受理

図1 DC半連続鑄造用鑄型およびフロート形状⁽³⁰⁾. 鑄型寸法: 外径 230 mm, 高さ 85 mm. ①断熱材使用鑄型, ②純銅製鑄型, ③シャワー冷却コントロールリング, ④鑄型ホルダー(水冷ジャケット). フロート寸法: 外径 135 mm, 高さ 40 mm.

図3 鑄造時の凝固界面形状. (a) 改良鑄型およびフロート使用(羽毛状晶), 鑄造温度 1013 K (740 °C), 鑄造速度 1.56 mm/s (94 mm/min), 冷却水量 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (120 L/min), (b) 従来法(粒状晶), 鑄造温度 993 K (720 °C), 鑄造速度 1.58 mm/s (95 mm/min), 冷却水量 $1.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (100 L/min).

図2 羽毛状晶発生に及ぼすフロート形状の影響⁽³⁰⁾. (a) ストレート穴: 4個(フロート外径も小), (b) 斜め穴: 5個, (c) 連続スリット.

分な冷却がない場合には凝固殻が薄く溶湯洩れの危険が増す。

図2(a)~(c)はフロート形状の改良とそれに対応した鑄塊横断面マクロ組織を示す。(a)はフロート穴がストレートに4ヶ所あるもので、羽毛状晶は鑄塊中央部に集中した。(b)はこれを改良し溶湯を鑄型壁側に分散するようにしたもので、写真のようにフロート穴に対応した位置にのみ羽毛状晶が発生す

るが、全体に広がることはなかった。(c)が最終形状で、溶湯補給を図のようにスリット状に連続させることで全羽毛状晶鑄塊を得ることができた。この様な鑄型および溶湯分散法の改良により図3のようにならかなり偏平な凝固界面形状の下で全羽毛状晶鑄塊の溶製が可能になった。

上記の鑄型、フロートにより 6063 合金に対する現場的な鑄造条件をまとめ、図4のような羽毛状晶

図4 6063合金DCビレットにおける全羽毛状晶発生3元状態図⁽³⁰⁾。

発生状態図を示すことができる。溶湯温度が高く、底面冷却効果が大いほど全羽毛状晶鑄塊の得られやすい事がわかる。

羽毛状晶生成の凝固条件については一方向凝固⁽⁹⁾⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾⁽³⁵⁾や半連続鑄造⁽³⁰⁾⁽³³⁾⁽³⁴⁾、ハンター法⁽¹⁴⁾、横型連続鑄造⁽³⁶⁾等においてそれぞれ報告がなされてきたが結果はまちまちであった。Al-3~7%Mg合金について、冷却速度と凝固速度をコントロールして行った著者らの実験⁽¹⁹⁾によれば、温度勾配と凝固速度によって、羽毛状晶生成領域を図5の例のように示すことができる。図5によれば羽毛状晶は粒状晶と柱状晶とに挟まれた三角形の領域で示すことができ⁽¹⁹⁾、一定凝固速度以上では羽毛状晶は発

図5 凝固速度および温度勾配と羽毛状晶生成領域の関係(Al-7%Mg合金の例)⁽¹⁹⁾。

生せず柱状晶か粒状晶となることがわかる。このほかMg濃度が大きくなるほどこの領域は柱状晶側に拡がることより、本来羽毛状晶の生成域は柱状晶領域に属するものであることがわかった⁽¹⁹⁾。

全羽毛状晶鑄塊の押出し性と押出し形材の性質

155 mm 径、長さ 600 mm の全羽毛状晶、半羽毛状晶および粒状晶ビレットを公称能力 15 MN(1500 tf)の押出し機を用いて、中実材押出し比 49(以下 S-49)および 72, 中空材押出し比 73 の 3 種類の形材に押出した⁽³¹⁾。押出し条件として、温度は現場操業では比較的低い 663 K(390°C)、比較的高い 723 K(450°C)とし、押出し速度は設定ラム速度 75 mm/s(0.45 m/min)と 10.8 mm/s(0.65 m/min)とした。図6は、中実材(押出し比 49)の同一条件下で押出した粒状晶と羽毛状晶の圧力、形材流出速度についてのチャートの比較例である。チャート解析で平均圧力、押出し所要時間、エネルギー計算などを行った結果、全羽毛状晶ビレットが効率の良いことがわかった。一例として図7に S-49 の押出し所要時間を示す。全羽毛状晶ビレットの方が最大 30~35%もの時間短縮が見られた。このほか押出しエネルギーを算出し、仕事量、仕事率などを比較しても、全羽毛状晶ビレットが良好な結果を得た。押出し比の大きい中実材、中空材でも同様の傾向がみられるが、羽毛状晶の優位性は小さくなるようである。

また羽毛状晶ビレットにおいては、羽毛状晶の成長方向への押出しがより効果的であることがわかった⁽³¹⁾。押し残し部メタルフローの検討によれば、ダイス穴位置と羽毛状晶の双晶境界の開き角の関係によっては、メタルフローが乱流となったり、層流

図6 同一押出し条件下における圧力-時間、および速度-時間曲線の比較図⁽³¹⁾。(a)粒状晶、(b)羽毛状晶。

図7 押し所要時間に及ぼす鑄塊組織の影響⁽³¹⁾.
中実材：押し比 49 の場合。

となったりし、圧力、時間に影響を与える。

押し成形材について、機械的性質、表面粗さ、陽極酸化皮膜等について調べたところ、押し温度が高いと多少強度が低くなる傾向はみられるものの、粒状晶と羽毛状晶との鑄塊組織による機械的性質の差は殆ど認められなかった⁽³²⁾。

押し成形材の集合組織についても調べた⁽³²⁾。羽毛状晶ピレット S-49 成形材について、比較的低い押し温度 663 K で、押しのラム速度も遅い場合の集合組織を図 8 に示す。アルミニウムの冷間圧延板に

図8 6063 合金全羽毛状晶ピレット押し成形材の (111) 極点図⁽³²⁾. 中実材押し比 49, 押し温度 663 K (390°C), 押し速度 7.5 mm/s (0.45 m/min).

みられるような、中間方位 $n(123)[21\bar{1}]$ と $(130)[3\bar{1}5]$ のほかに、羽毛状晶の特徴である $(121)[\bar{1}11]$ の鑄造集合組織が残存する。しかし、押し温度が比較的高い場合 (723 K) には図 9 のように羽毛状晶の $(112)[\bar{1}11]$ は完全に消滅し、粒状晶のものと同一となる。押し温度が 663 K でも、押し速度が速い場合、また押し比の高い場合も図 9 と同様である。ただ温度が高く押し比の大きい粒状晶では熱間圧延に見られる $(110)[001]$ の方位が現われる。

羽毛状晶鑄塊を圧延加工した場合には鑄造組織が残るとの報告⁽²⁴⁾⁽²⁵⁾もあるが、熱間押し加工すると、羽毛状晶の特定方位 $(112)[111]$ は消滅し、圧延集合組織に移行することが明らかとなった。

図9 6063 合金全羽毛状晶ピレット押し成形材の (111) 極点図⁽³²⁾. 中実材押し比 49, 押し温度 723 K (450°C), 押し速度 7.5×10^{-3} m/s (0.45 m/min).

ま と め

一般に防止対策が考えられている羽毛状晶組織について、逆に鑄塊全体を羽毛状晶化する方策と、その鑄塊の押し加工への利用結果を紹介した。全羽毛状晶鑄塊の利用は経済的に大きなメリットがあるものと確信している。しかしながらこの組織は Al および Al 合金特有のもののように、発生、成長に関してはまだまだ不明な点も多い。例えば、 (111) 双晶面を有する個々の板状結晶の優先成長方位は $\langle 112 \rangle$ と $\langle 110 \rangle$ とはいわれ定説がない。また羽

毛状晶の生成機構についての報告は多く、我々も詳細なマイクロ組織観察から双晶境界の形成過程について報告している⁽³⁷⁾⁻⁽³⁹⁾が、いまだなぜ他金属に羽毛状晶組織が観察されないのかについて、妥当な説明がなされたことはない。また加工性の良い理由について詳しく触れた報告もない。今後の研究がまつれる。

文 献

- (1) 西村秀雄, 豊原富弘: 日本金属学会誌, 6(1942), 412.
- (2) J. Herenguer: *Revue Met.*, 45(1948), 139.
- (3) K.T.Aust, F.M.Krill and F.R.Morrall: *Trans. AIME*, 4 (1952), 78.
- (4) B.Chalmers: *Trans. AIME*, 200(1954), 519.
- (5) V.O.Yesin: *Phys. Metals Metallog.*, 15(1963), 102.
- (6) V.O.Yesin: *Phys. Metals Metallog.*, 16(1963), 14.
- (7) V.O.Yesin: *Phys. Metals Metallog.*, 17(1964), 101.
- (8) J.W.Faust, H.F.John: *Trans. Met. Soc. AIME*, 233(1965), 230.
- (9) L.R.Morris, J.R.Carruthers, S.A.Plumtree and W.C.Winegaed: *Trans. Met. Soc. AIME*, 236(1966), 1286.
- (10) 中谷義三, 清水恭治, 福田健児, 橋本 隆: 軽金属, 18 (1968), 165.
- (11) 中谷義三, 清水恭治, 福田健児, 橋本 隆: 軽金属, 18 (1968), 217.
- (12) 渡辺修一郎, 本間梅夫, 雄谷重夫: 軽金属, 19(1969), 279.
- (13) 松石藤夫, 本間梅夫, 雄谷重夫: 軽金属, 19(1969), 287.
- (14) H.Fredriksson and M.Hillert: *J. Mat. Sci.*, 6(1971), 1350.
- (15) 宮沢信太郎, 本間梅夫, 雄谷重夫: 軽金属, 22(1972), 143.
- (16) J.A.Eady and L.M.Hogan: *J. Crystal Growth*, 23(1974), 129.
- (17) L.R.Morris and M.Ryvola: *Microstructural Science*, 9 (1981), 241.
- (18) 佐藤知敏: 日本金属学会誌, 49(1985), 369.
- (19) 穴田 博, 舟木克之, 中島安治, 沢武尚直, 多々静夫: 軽金属, 36(1986), 562.
- (20) 寺井士郎: 軽金属, 24(1976), 42.
- (21) W.D.Walter, C.M.Adams and H.F.Taylor: *Trans. AFS*, 61(1953), 664 and 62(1954), 154.
- (22) J.A.Eady, I.O.Smith and C.McL. Adam: *J. Inst. Met.*, 101(1973), 162.
- (23) K.T.Aust, F.M.Krill and F.R.Morrall: *J. Metals*, 4(1952), 865.
- (24) J.Baumgarten and W.Bunk: *Z. Metallk.*, 64(1973), 679.
- (25) 本間梅夫: 軽金属, 26(1976), 298.
- (26) 室町繁雄, 堀 茂徳, 時沢 貢, 室谷和雄: 軽金属, 18 (1968), 520.
- (27) 堀 茂徳, 時沢 貢, 室谷和雄: 軽金属, 21(1971), 520.
- (28) 堀 茂徳, 時沢 貢, 室谷和雄: 軽金属, 21(1971), 524.
- (29) 時沢 貢, 室田邦明, 室谷和雄: 日本金属学会誌, 40(1976), 564.
- (30) 室町繁雄, 穴田 博, 多々静夫, 時沢 貢: 軽金属, 30 (1980), 537.
- (31) 室町繁雄, 多々静夫, 時沢 貢, 穴田 博: 軽金属, 30 (1980), 545.
- (32) 室町繁雄, 時沢 貢, 多々静夫, 穴田 博: 軽金属, 31 (1981), 179.
- (33) W.Roth and M.Schippers: *Z. Metallk.*, 47(1956), 78.
- (34) 室町繁雄, 瀬川吉夫, 穴田 博: 軽金属, 26(1976), 183.
- (35) 中尾義信, 古沢敦郎: 軽金属, 12(1962), 170.
- (36) B.Radonijic: *Aluminium*, 58(1981), 646.
- (37) 穴田 博, 小島 忍, 多々静夫: 軽金属学会第 68 回大会講演概要, (1985), 軽金属投稿中.
- (38) 穴田 博, 橋本行史, 多々静夫: 軽金属学会第 70 回大会講演概要, (1986), 軽金属投稿中.
- (39) 穴田 博, 中根秀行, 多々静夫, 堀 茂徳: 軽金属学会第 72 回大会講演概要, (1987), 軽金属投稿中.

<新 刊 案 内>

材 料 の 組 織 と 機 能 (材料テクノロジー 7)

堂山昌男 山本良一 編
伊藤邦夫 堀内繁雄 牧島亮男
栗田恵輔 魚本健人 森 実 共著

本書は「材料テクノロジー」全 25 巻のうちの第 7 巻であり、内容は次の 5 章からなる。

1. はじめに(12 頁). 2. 組織形成の基礎(44 頁). 3. 加工と熱処理による組織変化(22 頁). 4. 材料の構造(58 頁). 5. 材料の状態分析(42 頁).

材料科学は結晶構造の単純な金属の領域で発展したので当然であるが、金属系学部学生にとっても(よく勉強している学生ならば)1, 2, 3, 5 章は容易に理解される。4 章は、セラミックス, ガラス, 高分子材料, コンクリート, 複合材料に分けてその構造を説明している。この中に金属が含まれていないのは、他の章の

例に金属がしばしば引用されているからに他ならない。金属系, あるいは材料系学生は副教科書として、大学院修士課程の学生は知識を整理するのに好適である。格調高い内容であるがよく平易に記述されている。材料系以外の技術者の再教育用テキストとしても好適であろう。これからは「金属」の壁を払って「材料」の視点から学習すべきであり、本学会は脱皮を急がなければならないことを本書を通覧して感じさせられる。

(H.S.)

[A 5 判 196 頁 1988 年 2,800 円 東京大学出版会]