高圧下で凝固した Al-8%Si 合金の 肉厚感受性について

藤井 則久*・藤井 満*
森本 庄吾*・岡田 千里**

Mass effect of Al-8%Si alloy in squeeze casting

UDC : 669. 715 '782-14 : 539. 4

Norihisa FUJII*, Mitsuru FUJII*,
Shogo MORIMOTO* and Senri OKADA**

Mechanical properties and microstructures of squeeze and gravity castings having different diameters from 30 to 140 mm were measured. As the diameter of squeeze and gravity castings is increased, mechanical properties particularly of gravity castings lower. Elongation and impact strength are noticeably insensitive to diameter change. Squeeze castings have dendrite cell size about two third of that the gravity castings have. Eutectic Si particle size in squeeze castings is unaffected by diameter change. The solidification time for both castings are proportional to $(V/S)^2$ in accordance with Chvorinov's law. The proportional constants of squeeze and gravity castings are 21.2 and 42.1 s/cm² respectively. The solidification time for squeeze castings is about one half of that for gravity castings having the same diameter.

(Received January 30, 1984)

1. ま え が き

金属の凝固途中において高圧力をかけ、凝固が終了するまで保持し、所定の製品を成形する高圧凝固法は凝固収縮欠陥の減少、凝固時間の短縮、ミクロ組織の微細化および良好な鑄肌が得られる等の特徴がある。この高圧凝固鑄造材は引張強さおよび伸び等の機械的性質が他の鑄造法から得られたものより著しく向上することはよく知られており、この原因の一つとして金型と鑄物の熱伝達係数が4倍向上するためであるということについて前報で報告した¹⁾。

機械的性質は製品の肉厚変化により変わるいわゆる肉厚感受性があり、重力鑄造法でのそれは多く報告されている^{2),3)}。しかしながら高圧凝固法が鑄造プロセスとして使用され始めているにもかかわらず、本鑄造法の肉厚感受性について報告された例は少なく、佃ら⁴⁾がディーゼル機関用のピストンを高圧凝固し、その各肉厚部での機械的性質について述べているにすぎない。この報告を

みると肉厚による機械的性質の変化は重力鑄造の場合より小さいことがわかる。

本報告では高圧凝固の肉厚感受性を直径30~140 mmまで5段階に変化させた円柱丸棒を用いて調べた。

高圧凝固した素材の機械的性質および鑄造組織と同じ径の金型に鑄造した重力鑄造材と比較し、肉厚変化による機械的性質の変化割合について検討を加え、高圧凝固法を製品の成形加工に適用する場合の金型方案設計の指針とした。

2. 実験方法

2.1 供試材の作製方法

供試材は Al-8 % Si 合金を用いた。99.99 Al および Al-20% Si 合金を用い、目標成分に配合し、シリコン電気炉で溶製した。溶落後 730℃で市販のフラックスを使用し脱酸および脱ガスを行い、沈静後に 715℃で所定の金型内に注湯し、高圧凝固および重力鑄造した。

Table 1 に供試材の化学組成を示す。

* (株)日立製作所・日立研究所 (日立市)。Hitachi Ltd. Hitachi Laboratory (Hitachi)。

** (株)日立製作所・本社 (東京都)。Hitachi Ltd. (Tokyo)。

本実験の高圧凝固装置は先に報告した装置¹⁾を加圧能力 100 トンに改良したものを用いた。**Fig. 1** に鑄造方案および金型寸法を示す。重力鑄造のものは押湯をつけた。**Table 2** に実験条件を示す。各径での加圧力は予備実験の結果から内部欠陥の発生しない最低の圧力を用いた。重力鑄造材および高圧凝固材ともすべて鑄放して試験に供した。

2.2 マクロ組織およびミクロ組織

マクロ組織は各素材の中心部で縦切断し、切断面をサンドペーパーにより、1000 番まで仕上げたのち、塩化第 2 銅水溶液で腐食し観察した。一方ミクロ組織は引張試験片の中心部近傍を観察した。

デンドライトセルの測定は各ミクロ組織を 50 倍にし、その視野中に存在するセルの数を視野面積で割った値を平均セル面積とし、その表示はセルを円と仮定して直径で表した。共晶 Si 粒径は宮田ら⁵⁾の手法を用いた。ま

Table 1 Chemical composition of specimen. (wt%)

	Si	Fe	Al
Al-8Si	7.85	0.16	bal.

た α 晶の面積率は点算法で行った。

2.3 機械的性質の測定

引張試験は 10 トンインストロン引張試験機を用い、歪速度 0.2 mm/min で行った。伸びの測定には標点距離 25 mm のクリップゲージを用いて行った。硬さはミクロ組織観察した試料を用いて、ビッカース硬さを測定した。**Fig. 2** に引張試験片および密度試験片形状を示す。衝撃試験片は JIS 3 号シャルピー試験片を用いた。これら試験片の採取方法および位置は前報と同様である。密度の測定は水中浸漬法により求めた。浸漬用の水は真空中で 20 分間脱気した蒸留水を使用した。

2.4 凝固時間の測定方法

凝固時間の測定方法は高圧凝固および重力鑄造ともに前報と同様で詳細は省略する。測定位置は各肉厚の中心部で金型底部より 60 mm とした。

3. 実験結果および考察

Photo 1 にマクロ組織の一例を示す。高圧材（以下高圧凝固鑄造材を高圧材と称する）は素材径が大きくなるに従い柱状晶領域が広がる傾向が見られた。とくに加圧プランジャ側（上部）および側面での成長が顕著である。底部側にはほとんど見られなかった。一方重力材

Fig. 1 Schematic drawing of casting plan and mold size.

Table 2 Experimental conditions.

factors diameter (mm)	pouring temperature (°C)	mold temperature (°C)	applied pressure (kg/cm ²)	press start time (sec) (after pouring)
30	715±5	275±15	1000	8
50			540	9
75			400	17
100			360	14
140			320	16

(以下重力鑄造材を重力材と称する)は素材径にあまり影響されずほとんど等軸晶領域であつた。高圧材は加圧により鑄物内部の温度勾配が大きくなり、柱状晶が成長しやすくなったものである¹⁾。ただ径が小さい場合に柱状晶が成長しにくかつたのは凝固時間が短いために加圧の効果が十分に現れなかつたものと思われる。重力材の場合は素材径が変化しても鑄物内部の温度勾配まで影響をおよぼさなかつたために柱状晶が成長しなかつたもの

Fig. 2 Shape and dimensions of specimen for tensile and density tests.

と考えられる。結晶粒の大きさは本実験範囲内では高圧材と重力材とであまり変わらなかつた。

Photo 2 にマイクロ組織を示す。高圧材は α 晶が小さく共晶地に包含されたようになっている。デンドライトセルおよび共晶 Si は素材径が大きくなるに従い若干大きくなる傾向を示している。

一方重力材はデンドライトセルおよび共晶 Si も高圧材に比べて非常に大きく、素材径が大きくなるにつれてその傾向は著しくなる。この組織観察結果から直径 30 mm の重力材と直径 75 mm の高圧材のマイクロ組織が同程度である。

Fig. 3 にマイクロ組織の大きさおよび α 晶の面積率と素材径の関係を示す。図中の P は高圧材を、G は重力材を表す。この図から高圧材、重力材ともに素材径が大きくなるに従いデンドライトセル径も同様に大きくなるのがわかる。しかし高圧材のセル径は重力材のセル径のほぼ $2/3$ の大きさになる。また共晶 Si 粒径は高圧材においては素材径に関係なく $3 \mu\text{m}$ とほぼ一定であるが、重力

Photo 1 As-cast macrostructures of gravity and squeeze castings.

Photo 2 As-cast microstructures of gravity and squeeze castings.

材では素材径が大きくなるに従って徐々に大きくなる傾向にあり, 30 mmφで, 11μmなのが140 mmφでは17.5μmになる。一方α晶の面積率は素材径の小さい場合においては高圧材の方が多い傾向を示しているが, 素材径が大きくなるに従い, 高圧材と重力材はほぼ同程度になる。

以上ミクロ組織の結果から, 加圧することによってデンドライトセル径は重力材のセル径に比べてほぼ2/3の大きさになり, 共晶 Si 粒径は素材径にほとんど影響されないことがわかった。

Fig. 4, 5に各素材の凝固冷却曲線を示す。これらの曲線から凝固時間を求めた。**Fig. 6**に凝固時間と素材径の関係を示す。凝固時間は高圧材, 重力材ともに素材径が大きくなるに従い長くなり, 高圧材は重力材に比べて概ね1/3と短くなる。凝固時間の内, 共晶凝固時間（共晶が出てから凝固が完了するまでの時間とする）を見ると, 高圧材は素材径に関係なくほぼ6秒と一定であつた。一方重力材は素材径とともに著しく変化していることがわかる。これらのことは Fig. 3の結果, すなわち高圧材で

Fig. 3 Effect of material diameter on microstructure size and α phase area ratio. P for pressure squeeze casting and G for gravity casting.

Fig. 4 Cooling curves of gravity castings. The figures in drawing correspond to material diameter.

は素材径に関係なく共晶 Si 粒径が一定であり、重力材では素材径が大きくなるに従い、共晶 Si 粒径が著しく大きくなっていることと一致している。

これら加圧による凝固時間の短縮は金型と鋳物間の熱伝達の向上によるためである¹⁾。

Fig. 7 に健全性について調べた結果を示す。高圧材の密度は素材径が大きくなっても 2.675 g/cm^3 とほぼ一定である。一方重力材では素材径 30 mm および 50 mm においては高圧材と概ね同じであるが、それ以上の素材径になると低下する傾向にある。その値は素材径 140 mm で 2.673 g/cm^3 であった。この低下原因はデンドライト間のミクロシュリンケージによるものと思われる。前述したように重力材においては等軸晶組織であると同時に素材径が大きくなるに従い凝固時間が著しく長くなり、ミクロ組織も非常に粗くなる。このために大きく成長したデンドライト間に残留した液体が凝固の際ミクロシュリンケージとして残存するために密度が低下したものと考えられる。

Fig. 8, 9 に機械的性質におよぼす素材径の影響を示

Fig. 5 Cooling curves of squeeze castings. The figures in drawing correspond to material diameter.

Fig. 6 Effect of material diameter on solidification time. P for pressure squeeze casting and G for gravity casting.

す。Fig. 8 からわかるように素材径の増大につれて引張強さは高圧材および重力材ともに下る傾向にある。しかし同一径では高圧材の方が重力材よりも約30%高い。また 0.2%耐力および硬さは高圧材、重力材ともに素材径が変化してもほとんど変わらない。Fig. 9 の伸びおよび衝撃値の関係を見ると、引張強さの場合と同様、素材径の増大とともに低下する。しかし同一径で比較すると高圧材は重力材に比べて、伸びおよび衝撃値とも、ほぼ150%向上することがわかる。

Fig. 10 に機械的性質の低下率と素材径の関係を示す。これは素材径 30 mm の各機械的性質の値を100とし

Fig. 7 Effect of material diameter on density. P for pressure squeeze casting and G for gravity casting.

Fig. 8 Effect of material diameter on mechanical properties. P for pressure squeeze casting and G for gravity casting.

て各素材径での機械的性質の低下率を求めた。素材径140 mmにおける引張強さの低下率は高圧材で17%、重力材で26%である。伸びでは高圧材で11%、重力材で31%になる。また衝撃値においては高圧材で22%、重力材で39%と著しく低下することがわかった。

以上のように高圧材においても重力材と同様に素材径の増加によって機械的性質は低下するが、その低下率は重力材に比べて概ね20%小さいことがわかった。

以上加圧した素材の肉厚感受性は重力材のものよりも小さく、加圧の効果は素材径140 mmのように大きな素材でも十分に発揮されていることがわかった。このことは高圧凝固することによって、重力材のものよりも凝固時間の短縮および冷却速度が早くなっていることからわかる。

高圧凝固および重力鋳造の凝固時間は本報告では実測

Fig. 9 Effect of material diameter on mechanical properties. P for pressure squeeze casting and G for gravity casting.

Fig. 10 Effect of material diameter on reduction ratio of mechanical properties. (100 percent for 30 millimeter diameter.) P for pressure squeeze casting and G for gravity casting.

から求めて比較した。しかし方案上全く同じ金型形状にするのは難しい。このため重力鋳造でよく用いられる Chvorinov の法則⁶⁾を用いて高圧凝固および重力鋳造の凝固時間を補正し比較してみた。Chvorinov の実験式は(1)式のように表される。

$$t = C \times (V/S)^2 \quad (1)$$

ここでも t :凝固時間(秒), V :鋳物体積(cm^3), S :鋳物表面積(cm^2), C :凝固定数である。

Fig. 11に(体積/表面積)の2乗と凝固時間の関係を示す。なおここでは重力材の鋳物上面は空気と接触しているが断熱と仮定し S に含めていない。この図から加圧下の高圧凝固でも Chvorinov 則で整理できることがわか

Fig. 11 Relation between solidification time and square of volume over area ratio $(V/S)^2$. P for pressure squeeze casting and G for gravity casting.

Fig. 12 Relation between toughness and diameter. P for pressure squeeze casting and G for gravity casting.

る。この図から近似して凝固定数 C を求めると高圧材で 21.2 sec/cm^2 、重力材で 42.1 sec/cm^2 となった。

以上 chvorinov 則を適用して凝固時間を補正した結果加圧下での凝固時間は重力材の凝固時間の約 $1/2$ となることがわかった。

加圧下で凝固した素材の機械的性質において、とくにすぐれた点は素材径が大きくなっても、伸びおよび衝撃値の低下が小さいことである。これは材料の靱性すなわち粘り強さ⁷⁾と共通するところがあると考えられる。ここで前述の機械的強さを粘り強さで整理してみると **Fig. 12** のようになる。この粘り強さは引張試験によって得られる応力-歪曲線の破断までの面積を測定したものである。この図からわかるように高圧材は素材径が大きくなっても重力材に比べて非常に粘り強さが高く、ほ

Photo 3 Fracture surfaces of tensile tested specimens.

ぼ3倍向上する。低下率でみると、各素材径30 mmの粘り強さを100とすると高圧材140 mmのもので29%、重力材140 mmのもので50%程度であることがわかる。

Photo 3 に引張破断面のミクロ組織を示す。破断は共晶 Si にそつて起つており、共晶 Si の小さい高圧材の方が靱性に富んでいることは明らかである。**Photo 4** に引張破面の SEM 観察結果を示す。高圧材の破面は延性の特徴である細いディンプルで占められている。また素材径が140 mmと大きくなっても、ディンプルで占められている。一方重力材では素材径30 mmにおいても脆性破面の特徴であるリバーパターンであり、ディンプルはほとんど観察されない。素材径が140 mmになると著しく大きい脆性破面であることが観察できる。

以上の結果から高圧材の靱性は肉厚の増大とともに重力材と同様に低下するがその低下率は重力材より20%小さくなることがわかった。

このように靱性が向上する原因として前述したように密度の向上、ミクロ組織の微細化が考えられるが加圧による相平衡状態が変化し、そのためによる α 晶面積率の増加が原因の一つになるとも思われる。圧力による相変化は Clausius-Clapeyron の融点上昇の式⁸⁾からも推測できるが本実験範囲内では加圧力が小さいために、高い融点上昇は考えられない。そのため相変化もわずかと思われる。ちなみに鈴木⁹⁾は、純 Al で実験を行い、 $6,000 \text{ kg/cm}^2$ の加圧下で約 6°C の融点上昇が見られたと報告している。Fig. 3 の α 晶面積率は素材径が小さい場合においてのみ重力材よりも高圧材の方がわずかに多くなっている。これは素材径が小さい場合、健全な鋳物を得るために高い加圧力を必要としたためにその結果として

Photo 4 Electron fractographs of tensile tested specimens.

若干 α 晶面積率が増加したと思われる。高い加圧力による α 晶面積率の増加傾向は Chatterjeeら¹⁰⁾の結果と一致している。

以上の結果から α 晶面積率が靱性におよぼす影響は素材径の小さい場合においてわずかに寄与していると考えられる。

4. 結 言

Al-8%Si合金を供試材として、高圧材の肉厚感受性を重力材の肉厚感受性と比較検討した結果以下の点を明らかにできた。

1) 高圧材の肉厚感受性は重力材と同様素材径が大きくなるに従い機械的性質は低下する。その低下率は重力材よりも概ね20%小さい。とくに伸びおよび衝撃値の低下は小さい。

2) ミクロ組織の大きさにおよぼす素材径の影響は高圧材および重力材とも、素材径が大きくなるに従いデンドライトセル径も大きくなる。高圧材でのその大きさは重力材の約2/3程度である。また高圧材の共晶 Si 粒径は素材径にほとんど影響されない。

3) 凝固時間を Chvorinov則で整理すると、高圧材においても良い比例関係が見られ、その比例定数は高圧材で21.2 sec/cm² 重力材で42.1 sec/cm² と素材径が同じであれば高圧材の凝固時間は重力材のほぼ1/2となることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 藤井則, 岡田, 森本, 藤井満: 軽金属, **33** (1983), 392.
- 2) 軽金属協会編: アルミニウム合金鋳物, 軽金属協会, (1966), 9.
- 3) 軽金属協会編: アルミニウムハンドブック, 朝倉書店, (1963), 90.
- 4) 佃, 赤沢, 高田: 神戸製鋼技報, **19** (1969), 186.
- 5) 宮田, 菊地: 鋳物, **45** (1973), 563.
- 6) 鋳造技術講座編集委員会編: 鋳造技術の基礎, 日刊工業, (1967), 101.
- 7) 炭本, 中村: 第79回鋳物協会講演概要集, (1971).
- 8) 三島: 近代鋳造, 金属加工出版, (1970), 249.
- 9) 鈴木: 特殊鋳造法, 日刊工業, (1968), 335.
- 10) S. Chatterjee, A. Das: *The British Foundryman*, **66** (1973), 118.