圧縮荷重負荷によるアルミニウム合金ダイカストの 鑄巣欠陥の低減

半谷 禎彦*・北原 総一郎**・天田 重庚*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 56, No. 2 (2006), pp. 112-116

Reduction of porosity in aluminum alloy die castings by compression load

Yoshihiko HANGAI*, Soichiro KITAHARA** and Shigeyasu AMADA*

The porosity in die castings has an influence on their mechanical properties or air leakage efficiency. To reduce the porosity, we examined compression tests of disk shaped ADC12 aluminum alloy die castings at room temperature. Also, finite element analyses are carried out corresponding to the compression tests. The porosity of the die castings decreases when the compression strain of the specimen increases, particularly in the middle area of the specimen where many defects exist. Thus, this type of compression load is significantly efficient in reducing the variation in the quality of die castings. However, it is necessary to investigate the condition of compression strain that prevents the initiation of cracks during the compression loading.

(Received July 8, 2005 Accepted October 3, 2005)

Keywords: die casting, porosity, aluminum alloy, pore defect, compression test

1. 緒 言

ダイカスト法は、溶融金属を精密な金型に高圧・高速で射出する鑄造方法である。高圧・高速射出のため短時間に大量生産が可能であるが、溶湯の乱れにより金型内空気を巻込むことや、離型剤が溶湯と反応し気化することなどにより、製品内部にブローホールが生じる¹⁾。また、金属の凝固収縮のため引け巣が生じる¹⁾。鑄造圧力を高めることで、これら鑄巣欠陥をある程度防ぐことが可能であるが、凝固の方向によりそのまま残留する場合も多い。製品内部の鑄巣欠陥は、機械的性質の低下や気密性の不良など、製品の品質に悪影響を与える。そのため、有機溶剤などを含浸させることにより、ダイカスト内の欠陥を埋めているのが現状である²⁾。しかし、コスト、時間両面で生産効率が悪く、また、有機溶剤が使われるため、環境への影響を考慮した他の方法が望まれる。一方、鍛造に見られるように、製品に負荷される圧縮荷重や衝撃荷重は、製品内部の鑄巣や引け巣を消滅させるなどの効果を有する³⁾。

そこで本研究では、このような鍛造効果を応用して、カーエアコン用コンプレッサなどのアルミニウム合金ダイカスト製耐圧部品の気密漏れをなくすことを目的に、単純な形状のアルミニウム合金ダイカスト製試験片に常温で圧縮荷重を負荷することによって鑄巣欠陥の低減を試み、基本的な検討を行う。このような研究は、例えば、発電機器部材や船舶用部材など大型の製品を鋼塊から熱間自由鍛造で製造する際に、ザクと呼ばれる微小な鑄巣欠陥を圧着し健全な内部性状を得る試みなど、これまでに多く報告されている^{4)~6)}。しかし、

本手法のように、複雑な形状の製品をダイカストにて製造し、後処理としてダイカストの欠点である鑄造欠陥を鍛造で改善することを目的とした研究は少ない^{7),8)}。実際の製品に応用するためには、多量に内在する鑄巣欠陥を一度のプレスですべて低減できるのか、どの程度の荷重を加えればよいのか、あるいは鑄巣欠陥低減のための圧縮荷重に製品が耐え得るだけの鍛造性を有するのかといった検討が必要となる。特に、生産性をも考慮すると、室温に近い温度での実施が不可欠となるが、その可能性についての検討が必要となる。

このような圧縮荷重負荷の工程を導入することは生産性の面では不利のようであるが、プレス加工は有機溶剤の含浸工程に比べて格段に短時間で済み、環境面でも優れている。更に一般のダイカスト製品で行われている、ばり取りなどの後加工の際に、同一工程で行える可能性があり、大幅な生産性向上が期待できる。

本研究では、まずアルミニウム合金ダイカスト製円盤状試験片をプレス機械により圧縮荷重を負荷して、漏れの直接の原因となる試験片内の鑄巣の量と圧縮荷重の大きさとの関係を調べる。次に今述べた実験に対応する有限要素法解析を行い、実験と同様に鑄巣の量と圧縮荷重の大きさとの関係を調べる。以上より、実験と解析の両面から圧縮荷重負荷による鑄巣低減の有効性について明らかにする。

2. 実験方法

試験片には、Fig. 1 に示すような円盤状の ADC12 アルミニウム合金ダイカストを用いた。Table 1 に用いた試験片の合金組成を示す。ADC12 は鑄造性がよく、自動車または各種

* 群馬大学工学部機械システム工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1). Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Engineering, Gunma University (1-5-1, Tenjin-cho, Kiryuu-shi, Gunma 376-8515). E-mail: hanhan@me.gunma-u.ac.jp

** グンダイ株式会社 (伊勢崎市). Gundai Co., Ltd. (Isesaki-shi, Gunma).

Fig. 1 Compression specimen of ADC12 die casting.

Table 1 Chemical constituent of ADC12 (mass%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Sn	Al
ADC12	10.81	0.69	2.29	0.20	0.21	0.72	0.05	0.02	Bal.

Fig. 2 Schematic illustration of experiment.

機械部品などのダイカスト製品に多用される合金である⁹⁾。試験片は1個取りで作成し、鑄造圧力は約70MPaである。試験片内のガス量は2試験片について調査し、それぞれ5.1, 6.7cm³/100g・Alであった。プリスタ試験(500°C, 2時間)では試験片全体にふくれが多発し、また後述の顕微鏡観察から欠陥は円形状で滑らかであったことから、本研究での鑄巣欠陥はブローホールが主である。試験片寸法は、上底直径36mm, 下底直径40mm, 厚さ10.2mmであり、金型から抜けやすくするために側面にわずかに勾配が施してある。圧縮実験は常温で行った。これらの試験片をプレス機械により、Fig. 2に示すようなジグを介して上底部に圧縮荷重を負荷した。最大荷重は約80トン、最大速度は約180mm/sであった。計測は、試験片の高さ方向のひずみ(圧縮率, ϵ), および内部の鑄巣率(ある断面積に対する鑄巣面積の率, p)について行った。鑄巣率算出には、まず、試験片の半径方向断面を表面研磨の後、顕微鏡観察で画像を取込み、画像処理を施すことで二値化を行った。その際、適切なしきい値を設けるこ

Fig. 3 Schematic illustration of sampling areas.

Fig. 4 Schematic illustration of two-dimensional square with circle-shaped pore for FEM analysis.

とで、鑄巣を黒、母材を白と分離することが可能であった。次に、画像全体のピクセル数(幅640ピクセル, 高さ480ピクセル)に対する黒のピクセル数の割合を計算し、その割合を鑄巣率とした。このように断面を直接顕微鏡観察することにより、アルキメデス法などに比べて、局所的な鑄巣欠陥を精度よく観察することが可能である。

1つの円盤状試験片について、中心から半径方向に90°間隔で4断面を切出した。表層部領域と内部領域の違い、および圧縮荷重負荷の中心軸近傍領域と中心軸から外れた領域の違いを観察するため、Fig. 3に示すように1断面につき4つの領域を観察対象とした。1つの領域につき、領域内で位置を少しずつ変えながら4点で画像を取込んだ。取込んだ画像の大きさは幅約1.2mm, 高さ約0.9mmである。後に示す鑄巣率の結果は、16点(4断面×4点)の平均値を示す。

3. 解析方法

3.1 解析対象

第2章に示した実験に対応する解析を行うために、Fig. 4に示す幅20mm, 高さ10mmの長方形モデルについて、軸対称三角形6節点要素を用いて弾塑性有限要素法解析を行った。要素数は約9000, 節点数は約18000である。その際、Fig. 4に示すような円孔を導入することにより、鑄巣欠陥とみなした。円孔の直径は、実際のダイカスト試験片の顕微鏡観察により、大き目の欠陥である直径0.2mmの場合について行った。また、圧縮荷重は上辺にy方向の様な強制変位を与えることで実現した。実際の実験に対応する解析を行うため、圧縮ひずみ $\epsilon=0\sim16\%$ の範囲で2%ごとに解析を行った。また、第2章の実験では潤滑剤を用いなかったこと、および圧縮荷重負荷後、試験片がたる型になっていたことから、

Table 2 Material properties of ADC12 for FEM analysis

	Young's modulus (GPa)	Yield Stress (MPa)	Tangent modulus (MPa)	Poisson's ratio
ADC12	8.98	357.9	882.3	0.3

Fig. 5 Microstructures of die castings.

ジグに接する上辺と下辺は摩擦が大きく、 x 方向変位も少ないと思われるので、 x , y 両方向変位を 0 とした。円孔位置は、実験と同様 Fig. 3 に示される 4 領域について、それぞれ行った。

3.2 材料定数

解析で用いる材料定数を求めるために、第 2 章の実験で用いた ADC12 ダイカスト製試験片より切出した一辺 8mm、高さ 10mm の直方体形状試験片の圧縮試験を行った。得られた応力-ひずみ曲線について 2 直線近似を行った。用いた材料定数を **Table 2** に示す。ただし、ポアソン比は通常の金属で用いる値を採用した。

4. 実験結果

4.1 鑄巣欠陥顕微鏡観察

(a) 荷重負荷前

試験片表層部の例として、**Fig. 5** (a) に領域 A での荷重負荷前の顕微鏡写真例を示す。試験片表層部の領域 A, B は、鑄造の際、型により急冷されるため早い段階で凝固した部分であり、ブローホールは凝固の遅い内部に移動するため、鑄巣率は低いことがわかる。

試験片内部の例として、**Fig. 5** (d) に、領域 C での荷重負荷前の顕微鏡写真例を示す。試験片内部の領域 C, D は鑄造の際、遅い段階で凝固するため、大小の鑄巣が密集する領域である。

Fig. 6 Relationship between compression rate and porosity (areas A and B). **Fig. 7** Relationship between compression rate and porosity (areas C and D).

(b) 荷重負荷後

Fig. 5 の (b), (c) および (e), (f) に、圧縮率がそれぞれ $\varepsilon = 8.53\%$, $\varepsilon = 14.12\%$ で荷重負荷後の領域 A および領域 C での顕微鏡写真例を示す。圧縮荷重負荷の効果は領域 C, D の試験片内部で顕著であり、荷重負荷前と比較して、大きい鑄巣がなく、圧縮荷重により低減されていることがわかる。また、圧縮率が高いほど、鑄巣の低減率の高い様子が観察される。一方、領域 A, B の表層部はもともと鑄巣の少ないところであり、圧縮荷重負荷の効果は、顕微鏡写真を比べたのみでは明らかでない。

4.2 圧縮率-鑄巣率関係

圧縮荷重負荷による効果を定量的に検討するために、圧縮率 ε に対する鑄巣率 p の関係を示す。**Fig. 6** は領域 A, B のものである。アルミニウム合金ダイカストは、表層部では鑄巣率が低く、更に、もともと製品の違いや、部位により多少鑄巣率にばらつきが存在するが、圧縮率の増加に伴い、鑄巣率が低減されている傾向が見られる。分散分析の結果からも有意水準 5% に対して、圧縮率による鑄巣率の分散に有意差が認められた。また、領域 A と領域 B を比較すると、若干であるが領域 A の圧縮荷重軸下近傍の方が効率よく鑄巣率の低減がなされている。

Fig. 7 は領域 C, D のものである。製品自体の鑄巣の偏在や測定誤差により、多少鑄巣率にばらつきはあるものの、圧縮率の増加に伴い鑄巣率が低減されており、圧縮荷重負荷の

Fig. 8 Relationship between compression rate and porosity rate (areas A and C).

Fig. 9 Relationship between compression rate and porosity rate (FEM analysis).

効果が顕著に見られる。また、領域Cと領域Dを比較すると、鋳巣率低減の効率（圧縮前の鋳巣率からの減少率）は若干異なっているが、同じ圧縮率を負荷した場合には、鋳巣率は同程度になっている。圧縮率10数%で鋳巣率を元の鋳巣率の1/10以下にすることが可能であった。

ここで圧縮率の大きかった $\varepsilon=14.12\%$ と $\varepsilon=19.90\%$ では、試験片に微小な割れが生じた。

次に、表層部領域と内部領域の低減率の違いを見るために、領域Aと領域Cについて、圧縮荷重負荷後の鋳巣率 p を、圧縮荷重負荷前の鋳巣率 p_0 で基準化した鋳巣率比 p/p_0 と圧縮率 ε との関係をFig. 8に示す。表層部領域より内部領域の低減効果が大きいことがわかる。これは、表層部領域はジグにより塑性流動が制限されるのに対し、内部領域では制限を受けないためである。本研究のように圧縮荷重を負荷することは、内部領域に多くの鋳巣が存在するダイカストのような製品には特に効果があり、気密漏れを防ぐのに有効であることがわかる。

5. 解析結果

圧縮荷重負荷による効果を有限要素法解析により検討するため、圧縮率 ε に対する基準化した鋳巣率比 p/p_0 の関係をFig. 9に示す。ただし、領域Cと領域Dの14%と16%では、要素どうしの接触が起こっており、正確な鋳巣面積を求める

(a) before deformation.

(b) after deformation ($\varepsilon = 12\%$, area B).

(c) after deformation ($\varepsilon = 12\%$, area D).

Fig. 10 Shape of pore defects (FEM analysis).

ことができなかったが、参考値を示している。ここでの鋳巣率 p も、実験と同様、ある断面積に対する鋳巣面積の率を示す。

試験片上部の領域A、Bと、試験片内部の領域C、Dを比較すると、実験と同様、試験片内部は同じ圧縮率を負荷した場合でも、効率よく鋳巣の低減が図られていることがわかる。これは、試験片内部では試験片上部よりも塑性変形が大きいためである。Fig. 10(a)に鋳巣欠陥初期形状を、Fig. 10(b)、(c)に圧縮率12%のときの、領域Bと領域Dの鋳巣欠陥変形状を示す。領域Bでは、鋳巣欠陥上部で境界での拘束が強いためあまり潰れておらず、下部のみが流れているのがわかる。領域Dの試験片内部では、塑性変形が大きく潰れ方が大きいのがわかる。

一方、Fig. 9で領域Cと領域Dを比較すると、ほぼ同程度に潰れており、これは、実験結果と同じ傾向である。このことから、ダイカストのような内部に欠陥を多く含む製品に圧縮荷重を負荷する場合、圧縮荷重軸からある程度外れても低減の効果は同程度であることがわかる。

ここで、Fig. 10(c)に示すように、円孔状の鋳巣欠陥は、圧縮荷重負荷により、き裂状になり、高い応力集中を生じることが懸念される。しかし、実際にFig. 11に示すようなカーエアコン用コンプレッサに使用する場合には、A部の気密漏れを防ぐために矢印のような圧縮荷重負荷を考慮しており、鋳巣はB図のような形状になる。一方で製品使用時には円周

Fig. 11 Schematic illustration of cross section of front housing of car air conditioner. Arrows indicate the applied load.

方向の応力 (Fig. 11 において、紙面に垂直方向の応力) が主となるため、鑄巣欠陥にはき裂を開くようなモード I 型の変位は起こらないと考えられ、安全性に問題はない。

通常のブローホールは内圧が加わっている。参考のため、鑄造圧力と同じ 70MPa の内圧が加わっている解析も行ったが、低減率は若干低くなるものの、上記と同様に圧縮荷重により、十分な低減効果があることを確認している¹⁰⁾。

また、鑄巣サイズにより必要な低減効果を得る圧縮率が変わってくる可能性もあるが、他の円孔直径で解析を行った場合でも、ほとんど変わらないことも確認している。

6. 結 言

本研究では、アルミニウム合金ダイカスト製円盤状試験片に、常温で圧縮荷重を負荷し、気密漏れの直接的な原因となる鑄巣率低減の点から評価を行った。得られた結果を以下に示す。

(1) ダイカスト用アルミニウム合金は、鍛造用合金に比べて変形能は低いと言われているが、割れが起こる限界は 1 回のプレスで圧縮率 15% 程度であり、それ以下の圧縮率で十分鑄巣欠陥の低減は可能であった。

(2) 圧縮率の増加に伴い、鑄巣率の低減効果が増加していた。鑄巣欠陥の多い内部領域では圧縮率 10 数 % で鑄巣率を 1/10 以下に低減することが可能であった。ただし、圧縮率が高いと割れが生じるので、内部応力を最小限にとどめて、効率的に鑄巣を潰すための荷重の大きさの検討が必要となる。本研究で用いたような簡単な試験片によって、荷重と鑄巣低減率の関係が得られれば、実際の製品に適用する場合の効率的な荷重負荷の指針となる。

(3) 圧縮荷重負荷による鑄巣低減の効果は、鑄巣欠陥の著しい試験片内部において、最も顕著であった。また、試験片内部では欠陥の位置にかかわらず、ほぼ同様の低減効果があった。このことはダイカスト製品には不可避の品質のばらつきを減少させるのに有効である。実際のダイカスト製品では、鑄造後、所定の形状に切削加工されることも少なくなく、その場合、鑄巣の少ない表層部が削られ、鑄巣の多い内部領域が露出し、気密漏れなどの原因になることが多々ある。この領域の鑄巣を低減することが製品の品質化、高生産性につながる。

終わりに本研究の遂行に当たり、実験に協力して頂いた群馬大学学部生の榛葉 健君 (現 株式会社ユー・コーポレーション) に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会：技術資料 金属加工技術の選択と事例，(1986)。
- 2) 菅野友信，植原寅蔵：ダイカスト技術入門 (第 2 版)，日刊工業新聞社，(1997)。
- 3) 長田修次，柳本 潤：塑性加工，コロナ社，(1997)。
- 4) 磯邊邦夫，野口英臣，加藤和典：鉄と鋼，**77** (1991)，1680-1687。
- 5) 小野信市，南 克之，落合朋之，岩館忠雄，中田進一：日本機械学会論文集 C 編，**61** (1995)，2141-2146。
- 6) 渡辺和夫：九州共立大学研究報告，**27** (2003)，57-62。
- 7) 本村 貢，小野博史，三島哲也，宮地英敏，多田弘一：軽金属学会第 76 回春期大会講演概要，(1989)，195-196。
- 8) 本村 貢，小野博史，三島哲也，宮地英敏，深井茂樹：軽金属学会第 78 回春期大会講演概要，(1990)，59-60。
- 9) 藤田雅人：軽金属，**44** (1994)，574-589。
- 10) 浅田昌幸，阿久澤功，半谷禎彦，北原総一郎，天田重庚，吉川暢宏，桑水流理：日本鑄造工学会第 147 回全国講演大会講演概要集，(2005)，137。