特 集 号

解 説 ダイカスト casting および低圧 casting における最新技術

佐藤 敬*

The latest technology of die casting and low pressure casting process

Takashi SATOH*

1. 緒 言

アルミニウム鋳物の製造方法は、主にダイカスト法や、重力鋳造、低圧鋳造等の、金型にアルミニウム溶湯を注入する製法がとられている。金型を使用するため、寸法精度がよい、連続生産可能といった利点のある反面、溶湯注入、指向性凝固、製品離型等を繰返し安定させるための高度な制御技術が必要としている。

その中で、溶湯を金型に注入する手段として、また、凝固時に発生する鋳物欠陥を低減させる目的等で、加圧力を用いた制御技術を利用しているものがほとんどである。100～50 MPa レベルの高圧力を使用するダイカスト法から0.03～0.05 MPa 程度の空気圧力を利用して鋳造する低圧鋳造法まで、圧力の使用目的は多岐にわたるが、最新の圧力制御技術を導入、開発することは、今後、鋳物のより高い品質の要求に応えられる重要な鋳造技術の一つと思われる。

ここでは、減圧技術を生かし当社独自にシステム化したダイカスト（HIVAC 法）に関するものと、低圧鋳造法において、従来法以上の圧力制御技術を利用した霧閉気圧力鋳造法についての概略を述べる。

当社では、1992年に「次世代の高品位ダイカスト生産」をテーマに新しいシステムを計画した。これは環境改善を主体としながら、高生産性、高品質の製品が得られることを目標としたもので、HIVAC（Hitachi, Vacuum system）と名付け、1994年度に導入、量産を開始した。このシステムの特徴は、溶湯射出時の金型内減圧技術を生かし、従来一般ダイカスト法で使用される1/2～1/3以下の鋳造圧力に制御可能としたことである^{1),2)}。これにより、上記目標と同時に、設備や金型の相対的サイズダウン、金型寿命向上等、多岐にわたるメリットが得られた。

次に後半で報告する霧閉気圧力鋳造法であるが、これは低圧鋳造法の高度化技術として注目された差圧鋳造の

特徴や問題点を、当社独自に解決開発した鋳造法である^{3),4)}。一般的低圧鋳造法の加圧力（0.03～0.05 MPa）対比約10倍以上に制御することで、低圧鋳造の課題である湯口周辺の材料品質を改善させたものである。これにより、従来低圧鋳造法では得られなかった薄肉厚、軽量アルミホイール鋳造が可能となった。

2. HIVAC ダイカスト生産システム

完成させたシステムのレイアウトを図1に示し、外観を図2に示す。以下、それぞれの設備の概要について述べる。

2.1 配湯設備

HIVAC の配湯設備関係での一番の特徴は、ロンダーシステムを採用したことで、これは配湯設備の無人化、輻射熱の遮断、溶湯温度の安定性、酸化物発生防止等に最も効果があると考えられたためである。給湯温度は従来型保持炉の給湯温度の±10 K 変動に対し、ロンダーシステムでは±3 K 以下になり、大変安定することがわかった。また、給湯の安定性を確認するため、保持炉内の湯面高さの変動を測定した。最大高さと最小高さの差を比較すると6 mm (±3 mm) であり、設計仕様の±5

図1 新システムの設備レイアウト

* 日立金属(株) (熊谷市). Hitachi Metals Ltd. (Kumagaya-shi, Saitama).

受理日：平成9年7月2日

図2 新システムの外観写真

mmは十分満足した。湯面高さ精度は、後述のように、電磁ポンプの給湯精度、給湯口の詰まりに大きく影響するので、鑄造の安定性向上に寄与している。

また、炉内にてガス、酸化物を除去し、より清浄度の高い溶湯を鑄造機へ配湯するため、バッファ炉内に脱ガス装置 (Gas Bubbling Filtration 法: GBF) を設置した。このほか保持炉までの間に溶湯が酸化しないようロンダー構造のガスシール性を高め、炉体内を不活性ガス雰囲気中に置換することとした。バッファ炉内に設置したGBFの効果と炉内の不活性ガス雰囲気の効果によりバッファ炉内から鑄造機前の保持炉まで溶湯中の水素ガス濃度は、目標とした $0.2 \text{ m}^3/100 \text{ g Al}$ を満足するものであった。したがって、アルミニウムダイカストとしてはこれまでにない、高清浄度の溶湯で鑄造できるものである。

また、不活性ガス雰囲気の効果により炉内酸化物発生量を約70%減少させることができた。この結果、定期除滓作業を延長することができ、除滓による作業への負荷軽減と耐火物寿命改善効果が得られた。

2.2 鑄造

高生産性の目標として鑄造サイクルタイムの半減、すなわち1.2分 (当社1350tマシン実績)→0.6分 (36s: HIVAC 1000tマシン) を目標に掲げた。鑄造サイクルタイムの半減のために、鑄造機だけの改善だけでなく、給湯、離型剤、エアブロー、キュアリング等、各々の見直しを行った。

2.2.1 離型剤、潤滑剤の選択

水溶性離型剤による①ミスト、②汚れ、③エアブロー騒音等の対策のため、型締めを行った状態で離型剤を塗布することができる粉体離型剤の静電塗布法を採用した。離型剤はプランジャ内の潤滑剤と同じもので、黒鉛とワックスからなるものである。塗布は、離型剤を静電印加し、キャリアガスを用いて離型剤として金型キャビティ部、潤滑用としてプランジャへ同時に塗布する高能率のものである。

しかしながら、粉体離型剤による方法では、水溶性離型剤による場合と異なり、金型の外部冷却効果がなくなるため金型温度が上昇してしまう。

一般に、金型内部での冷却は、鑄造サイクル中に受ける全熱量の約80%であり、残りの約20%を水溶性離型剤による外部冷却効果と空気中への自然放熱で熱収支が成立していると言われている。したがって、粉体離型剤の採用に伴い約20%に相当する熱量を奪い去る金型の内部冷却方法を検討してきた。

開発した冷却方式のポイントは金型をゾーンと呼ぶいくつかの部位に分割し、各ゾーンに一つの冷却マニホールドを設け、内部の冷却水流量の増大と金型温度の均一化を図ったことである。この結果、冷却水流量は従来比約2倍となって、金型冷却効果の向上が果たせた。

粉体離型剤は、前述のように、水溶性離型剤に比較して金型温度の上昇をもたらすため、焼付、かじりといった製品外観品質に影響をもたらすこともあるが、逆に、湯じわ、湯境といった湯流れに関する不良の大幅減少、

鋳造上げ時の試打の減少、ブローホール等の内部欠陥の改善などの効果もあった。また、粉体離型剤は潤滑性も高く、プランジャ寿命も従来の水溶性黒鉛潤滑剤とほぼ同等であることがわかり、プランジャ潤滑剤にも粉体離型剤を用いることにした。従来のプランジャ潤滑剤は、蒸発、燃焼して大量のガスを発生することから、鋳造機周りの汚れ、製品中のブローホール等内部欠陥発生の主因となっているものと考えられる。したがって、ガス発生量の少ない粉体離型剤の使用により環境改善のみならず、後述のように、製品中のガス含有量の減少につながり、品質向上に寄与することもわかった。

2.2.2 給湯

スリーブへの給湯に関し、従来のラドル式では、

- ① 給湯時のガスの巻込みが多い
- ② スリーブが長く充填率が低い
- ③ 溶湯温度が低下しやすく凝固片発生の原因となる
- ④ 給湯速度限界が低い

等の制約があることからガスの巻込みが少なく、しかも給湯まで外気に触れず高速で給湯できる電磁ポンプを新たに採用した。電磁ポンプの給湯精度は、湯面高さに影響を受けやすいが、前述のようにロンダースシステムにより $\pm 5\text{ mm}$ で制御されているため、 $\pm 1.5\%$ となり、ラドル給湯に比べ精度が2倍に向上していることがわかった。また、保温性能があるのでラドル給湯よりも約30 K 高い温度で給湯できる。そのため、後述のように品質の安定と凝固片の発生抑制に大きく寄与することができた。

2.2.3 型温制御

(1) 金型温度制御装置

金型温度制御は、今後の熟練作業者の減少、省力化を踏まえ、これまでの経験値制御を定量現象としてとら

え、季節、時間その他変動要因に関係なく金型温度の再現性を高め、製品品質を安定させる目的で採用した。

金型温度制御装置は下記から構成されている。

- ① 入口側の冷却水温度を夏、冬季節に関係なく一定化させ、循環させる装置
 - ② パソコンおよび金型内熱電対 (T.C.) 16CH 入力および20CH AC 出力装置
- (2) 制御概念

基本的な制御概念は、前述のゾーン別に設けた各マニホールドに、ベースとなる冷却水を流すソレノイド弁 (任意の設定温度以上で常時開) と必要に応じて開閉されるバイパスソレノイド弁を金型に埋め込まれた T.C. からの入力で最小値 (射出スタート時の金型温度) と最大値 (サイクル中の最大金型温度) の温度傾向を前3ショットごとに読みとり、各マニホールドのバイパス弁開閉時間を目標となる金型温度にフィードフォワード制御する。設定する目標値は、最小値と最大値の中間値 $\pm$ 任意温度としてマニホールドごとに設定する。実際に、型温制御を開始すると制御なしに比較し約1/2の時間、約5ショットで、金型温度が安定し、金型温度制御が有効に機能することが確認された。

2.3 製品の評価結果

2.3.1 評価した製品および調査内容

次に、HIVAC システムで鋳造した製品の品質について調査した結果を述べる。図3は本システムで現在量産中の製品 (V6 エンジン用チェーンカバー、肉厚4 mm) の外観である。今回、以下の2項目について詳細に検討した。

- ① 製品内部の健全性評価……製品内部のガス量、異物、凝固片などの評価
- ② 製品の圧縮破壊強度ならびに製品から採取した試験片の引張特性の評価

2.3.2 製品の健全性の測定結果

(1) 製品ガス量の測定結果

新システム HIVAC による製品 (チェーンカバー; 以下 HIVAC 品と略記) の全含有ガス量を部位別に測定すると、ゲート側では4 ml/100 g Al 以下であり、反ゲート側でも7 ml 程度と、従来にない低い水準となっている。次に、HIVAC 品と、減圧ダイカストではあるが水溶性離型剤、油性プランジャ潤滑剤を用いラドルで給湯したダイカスト品 (以下、普通ダイカスト品と略記) とのガス量を比較した結果を図4に示す。HIVAC 品のガスは約50%が離型剤、または潤滑剤からもたらされたC系のガス成分であるが、窒素、水素、酸素の量がいずれも大幅に低減していることがわかった。全ガス量は、当社の他のこれまでのこれら製品の実測データよりも低い値になっている。これは、HIVAC の場合、前述のよ

図3 HIVAC システムにより量産中の製品例

図4 HIVAC品と普通ダイカスト品の残存ガス量の比較

図5 HIVAC品の圧縮破壊荷重とたわみの測定例

うに低レベルガス溶湯、粉体離型剤、潤滑剤の適用、電磁ポンプ給湯などの相乗効果によりこれらのガス含有が大幅に削減されたと考えられる。

(2) 異物、凝固片の発生頻度

異物、凝固片ともに HIVAC 品ではまったく見られなくなり、K モールド法による供給溶湯の評価においても異物発生はまったくなかった。したがって、加工時の異物発生率も 0% (加工累計 50 万個以上) であり、HIVAC 品は異物、凝固片発生に対しても優位であることが確認された。

2.3.3 製品強度

(1) 圧縮破壊強度

HIVAC 品、普通ダイカスト品の圧縮破壊試験結果を図 5 および図 6 に示す。縦軸は各供試品の平均破壊荷重

図6 普通ダイカスト品の圧縮荷重とたわみの測定例

図7 HIVAC品と普通ダイカスト品の引張強さおよび伸び

を100%とした指数を、横軸は製品のたわみ量を示す。プロットのばらつきは主に製品の健全性に影響されると考えられるもので、圧縮破壊荷重が高いものほどたわみ量も多くなる。図から、HIVAC 品の破壊荷重のばらつきは極めて小さく、このことから HIVAC 品は健全性が高いことがわかる。

(2) 引張特性

HIVAC 品、普通ダイカスト品 (同一形状) の引張特性の比較を図 7 に示す。HIVAC 品では伸びが 2.5~3.9%、引張強さが 260~280 MPa と、ばらつきが普通ダイカスト品よりも大幅に小さくなっている。これも、前述のように健全性の向上が強度ばらつき低減に大きく寄与しているものと思われる。

2.3.4 まとめ

HIVAC システムの特徴をまとめると表 1 のようになる。

(1) 当初定めた目標値をほぼ達成した。特に、粉体離型剤による改善効果が著しく、騒音、ミスト、汚れ等の

表1 HIVAC システムの諸特性

項 目		結 果
サイクルタイム		38 s (0.63 min)
環 境	騒 音	≦LEQ 85 dB
	暑 熱	35~40°C (炉壁)
溶 湯	ミ ス ト	微 少
	ド ロ ス 量	70%減
	H ₂ ガ ス 量	<0.2 cm ³ /100 g Al
溶湯温度のばらつき		±3°C 以内
給湯量のばらつき		<±1.5%
湯面高さの安定化		<±5 mm
金型温度制御		5 ショット目立上り

大幅改善ができた。

(2) HIVAC 品の製品ガス量は 3~7 ml/100 g Al であり、従来の普通ダイカスト品より少ない。

(3) HIVAC 品の圧縮破壊強度のばらつきは、普通ダイカスト品の1/2以下である。

(4) HIVAC 品の引張特性のばらつきは、普通ダイカスト法 (±10~40%) に比べて±5%と非常に少ない上に高い値が安定して得られる。

3. 霧囲気圧力鋳造法

3.1 差圧鋳造法の概略と特徴

差圧鋳造法 (Counter pressure casting process) と呼ばれる技術が公表されたのは、1961年の東欧ブルガリアの特許公報とされている³⁾。

もともになったのは、それより20年以上も前に Dornauf により研究されていた、アルミニウム鋳造合金の高圧ガス下での鋳造実験の結果であった。彼は圧力容器 (オートクレーブ) を用いて、砂型アルミニウム鋳物の機械的性質に対する圧力の効果について検討した。そして霧囲気圧力をかけることにより、引張強さや伸びが向上することを見出した。その一例を表2に示す。

ブルガリアの Balevski と Dimov は、その結果を参考に高圧ガス下でのアルミニウム鋳造合金の凝固について研究した。そして、保持炉に設置されているストックとオートクレーブとを接続させることにした。その構造は低圧鋳造機に類似しているが、圧力鋳造法の高生産性、高歩留まりに加圧鋳造の高品質を加えた一歩進んだ鋳造法と考えられ、差圧鋳造法と名付けられた³⁾。

彼らは、アルミニウム合金製のモータ部品や油圧部品、鋳鉄製のチェーン用ホイールなどの試作を行い、従来より品質的に優れた鋳物が得られたと報告した。この方法は技術的に注目されたが、工業化技術までには成熟

表2 霧囲気加圧による機械的性質調査例 (Dornauf)

合金系	処理状態	加圧なし		加圧0.3 MPa	
		σ_a	δ	σ_a	δ
1 Al-10Mg	均質化	230	8	290	21
2 Al-4Cu-Ti	急冷	260	3	300	9
3 Al-4Cu-2Ni-1.5Mg	鋳造のまま 時効硬化	94	0.4	※153	※0.8
		138	0.4	※241	※0.4
4 Al-4.5Zn-2Mg	時効硬化	260	3	320	7
5 Al-10Si-Mg	時効硬化	220	2.0	280	3.5

引張強さ: σ_a (MPa), 伸び: δ (%) (※加圧0.8 MPa)

図8 差圧鋳造工程

しなかったため、実際の利用はごく限られたものであった。

しかし、1970年代後半から、圧力制御系の発展に伴い開発関係者を中心に工業化が進んだ。フランス CETEF 社は積極的に取組み、二輪車用アルミホイールなどの生産を始めた。その後ドイツやアメリカにも導入され、わが国にもそれらの情報が入ってきた。

実際の鋳造工程は次のとおりである (図8)。

- (1) 型閉め、スタート準備
- (2) 炉側、鋳型側を高圧空気で加圧、同圧にする (P_1)
- (3) 鋳型側加圧力を少し下げ鋳込む [炉側加圧力 P_1 、鋳型側加圧力 P_2 ($P_1 > P_2$)]
- (4) 凝固 (炉側加圧力 P_1 、鋳型側加圧力 P_2)
- (5) 凝固終了後、炉側、鋳型側を同圧にする (P_3)
- (6) 冷却後、炉側、鋳型側加圧力を 0 にする
- (7) 型開き

具体的には鋳型側の霧囲気圧力を下げるることにより鋳込みを行い凝固中の最大霧囲気圧力は炉側で0.4 MPa、金型側で0.35 MPaの例が示されている。

その他、文献などにより得られた情報をまとめると、

表 3 鋳造条件

金型温度	溶湯温度	金 型 冷 却			使用材料：AC4CH 成分 (mass%)				
		横型	ディスク部	上型	Si	Mg	Fe	Ti	Sr(ppm)
400~520℃	700~730℃	水冷	水 冷	空冷	6.5~7.5	0.27~0.37	≤0.14	≤0.2	50~80

図 9 霧囲気圧力鋳造装置

差圧鋳造法は低圧鋳造法に類似した構造であり、しかも鋳型側も容器でおおわれ、凝固中の高圧空気で加圧される。その結果、鋳造欠陥の少ない、健全で機械的性質に優れた高品質鋳物が得られると考えられる。

3.2 霧囲気圧力鋳造法

上記の差圧鋳造法の情報から、霧囲気圧力がアルミニウム鋳物の品質向上に有効であろうと判断し、この技術を採用することにした。

まず、小型の圧力容器を作製し、この中を空気圧 1 MPa 以下にして、アルミニウム合金を鋳造、その品質を調査した。結果は、0.3~1.0 MPa 程度の霧囲気圧力下で鋳物の健全性が改善され、品質や機械的性質が向上した。

そこで、実用化の検討を行った。

3.2.1 鋳造装置

実用的な装置として、低圧鋳造機と同様に下方にアルミニウム溶湯保持炉を、上部に鋳型（金型）を配置する方式とし、保持炉および鋳型は独立した圧力容器でおお

図10 カウンタープレッシャー法の圧力制御曲線

った。そして、コンプレッサで発生させた高圧空気を容器内に送り各々の内部圧力を圧力制御装置により最大 1.5 MPa まで任意に制御できるようにした。その外観を図 9 に示す。本装置では、加圧空気を用いるので、全体の剛性、配管類の接続部や駆動部のシーリングなどに様々な検討を加えた。同時に、設備の安全性を重視し、電気的、機械的に二重、三重のインターロックをとった。また、金型の冷却には水冷を用いるので、水もれ対策にもいろいろ工夫をした。

3.2.2 実用化対象品

軽量化を強く要求されたアルミホイールを選定した。品質的に見ても、現状低圧鋳造品では冷却の遅い湯口付近の中央ディスク部に鋳造欠陥が発生しやすく、この欠陥が本製法により低減され、品質向上および軽量化が期待できることも主な理由であった。

材質は現状低圧鋳造品と同じ AC4CH-T6 合金とした。

3.2.3 鋳造実験

(1) 鋳造条件

基本的には、現状低圧鋳造の諸条件を参考に、表 3 に示す金型温度、溶湯温度、金型冷却等について検討し、健全度の高いホイールが得られる値を決めた。また、凝固シミュレーションの手法も取入れながら、適正条件を把握していった。

(2) 霧囲気圧力条件

霧囲気圧力の設定は、当初は前述のブルガリアのカウンタープレッシャー法に関する文献^{9)~7)}を参考にした。

その方法は図10に代表例を示す。

はじめその圧力曲線を参考に最適条件を把握しようとした。しかし、最初から目標圧力まですばやく上げようとすると、高圧空気を高速で送り込まなければならず、

図11 圧力制御法の改善

次のような問題が生じた。

- ① 溶湯が飛散し、酸化され铸件中に混入する。
- ② 鑄造開始時に金型温度が局部的に低下し、条件が不安定になる。
- ③ 圧力制御が不安定となり、溶湯の脈動が起こる。

これらの問題を解決するために、設備、方法両面から対策を実施した。

設備的には、高圧空気配管の容量や経路を検討し、改善して行ったが、最終的には、鑄込み方法をカウンタープレッシャー法の目標圧力下での鑄込みから、低圧鑄込み法に変更することにより上記問題点を解決することができた。図11にその例を示す。

3.3 铸件の品質評価

金型側の雰囲気圧力を0（低圧鑄造レベル）から1.0 MPaまで変化させ、ホイールの品質に与える効果について調べた。

冷却の速い薄肉の周辺フランジ部、タイヤ面では、圧力をかけなくても健全で欠陥は見られなかったが、冷却の遅い中央ディスク部、スポーク部では圧力をかけないと欠陥（鑄巣）が発生し、圧力を大きくかけるにつれて欠陥は小さく、少なくなっていくことがわかった（部位、図12参照）。

図12 引張試験片採取および組織観察位置

この結果から、冷却が遅く、欠陥が出やすい部位には、雰囲気加圧（実用的には0.6 MPa程度）は有効であると判断できる。対象ホイールで加圧により機械的性質も改善され、引張強さで約10%、伸びで約50%の向上が見られ、結果的に15%以上の軽量化ができた。

参 考 文 献

- 1) 川野勝海, 大西脩嗣, 今村具哉, 伊藤 仁: 日本ダイカスト協会論文集, JD92 22 (1992), 189.
- 2) 大西脩嗣, 鷹合徹也, 飯塚康夫, 影山 望: 鑄造工学, 68 (1996), 572.
- 3) 濱 葆夫, 渡辺 洋, 南 紀夫, 吉沢 亮: 軽金属, 44 (1994), 727.
- 4) 濱 葆夫, 渡辺 洋: 鑄物, 66 (1994), 950.
- 5) A. T. Balevski and D. Nikolov: ブルガリア特許 No. 187, 1961, 日本特許 特公昭45-19585.
- 6) A. T. Balevski and T. Dimov: THE BRITISH FOUNDRY, July, (1965), 280.
- 7) ドイツ Aluteam 社資料: Was ist precocast?
- 8) FOUNDRY TRADE JOURNAL, 6 OCTOBER, (1989), 744.
- 9) M. Manolov and H. Smetan: GIESSEI PRAXIS, Nr, 10, (1984), 152.