

ランナー加圧+PF法による『巣のない高強度ダイカスト』の量産化に向けた取り組み



川崎工業株式会社

川崎寛泰 ○山村健一 清水雄大 酒井隆志 平野貴之

株式会社ダイレクト21

岩本典裕 長澤理 久保木勲 齋藤繁明 菊池政男

Implementation of pressurized runner squeeze system and PF methods for a void-less, high strength casting and technical initiatives for mass production.

Kawasaki Industrial Co.,Ltd.

Hiroya Kawasaki, ○Kenichi Yamamura, Yuuta Shimizu, Takashi Sakai, Takayuki Hirano

Direct 21 Corporation

Norihiro Iwamoto, Osamu Nagasawa, Isao Kuboki, Shigeaki Saitou, Masao Kikuchi

Abstract

The most frequently occurring defects in a die casting process are porosities. It can be majorly classified into gas entrapment and shrinkage porosity. These porosities have a huge impact on the mechanical properties of the casted product and is one of the significant reasons for the loss of its strength. The target was to solve the problem of two different porosities that are caused by different factors with one solution. The goal was to integrate PF (Pore Free) die casting and pressurized runner squeeze pins into the traditional high speed die casting process to achieve excellent internal quality and mechanical strength and further achieve process stability during mass production. This experiment was evaluated based on dedicated casting plans, casting parameters, oxygen supply conditions and pressurized runner squeeze pin parameters. The results, effects and future prospects are discussed in this technical paper.

1. はじめに

自動車の電動化やカーボンニュートラルの影響により、軽量で対候性に優れ、複雑な形状も一体成形可能なアルミニウム合金ダイカストの需要は高まっている。一方でアルミニウム合金ダイカストには機械的強度にばらつきがあるという欠点がある。このばらつきの主要因として内部鑄巣欠陥が挙げられ、鑄巣には主にひけ巣とブローホールがある。ひけ巣は溶融合金の凝固過程で生じる凝固収縮により内部に発生する空隙であり、ブローホールは鑄込みの過程で溶湯内に閉じ込められたガスによる隙間である。この異なる要因で発生する内部欠陥を同時解消する方法として、ランナー加圧法とソフトPF法を組み合わせた新しい工法が開発され、株式会社プログレスと株式会社ダイレクト21より試作結果が報告されている¹⁾。

本報ではこの工法による量産に向けた取り組みと、将来のダイカスト品の展望について報告する。

2. 工法概要

本工法の特徴は、ソフトPF法における金型キャビティへの酸素供給および増圧射出完了後にタイムラグを設けてランナー部を高圧で加圧するランナー加圧を金型分流子に設けた1つのユニットで行うことにある。その動作図を図2-1に示す。

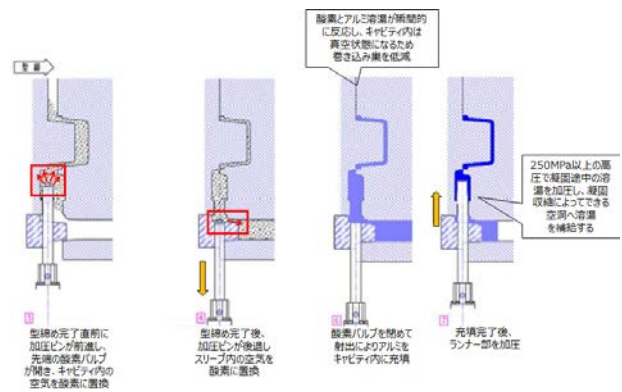


図2-1. 新工法の動作

3. 鑄造事例

3.1 製品概要

今回、本工法を用いて量産に向けて取り組んだ製品情報を表3-1に示す。

表3-1. 製品情報

製品名	インバーターブラケット
材質	ADC12-T6
鑄造機サイズ	350t
チップ径	φ70
1型込め数	1

本部品は強度部品であるため、内部鑄巣に対してその大きさなどに規格が設けられている。また後処理としてT6熱処理が必要であり、熱処理後にブリスト不良が発生する問題から現行品は層流充填ダイカストで生産をしている。層流充填ダイカストは内部品質面では優れたダイカスト法であるが、高速充填ダイカストと比較して、

- (1) サイクルタイムが長い
- (2) 大きな湯道で製品歩留まりが悪い
- (3) 湯口が大きく、チップソーなどでの切断工程が必要
- (4) 固体潤滑剤ベースの離型剤を使用するため金型や設備に堆積し、周囲が汚れる

などのデメリットがあり、一般的に製造原価は高くなる。そのため、製造原価低減の観点から本部品に新工法を適用して高速充填ダイカストで生産することを目標に取り組みを開始した。

3.2 金型方案

高速充填でダイカストするにあたって、金型方案は一般的なダイカスト方案をベースに(図3-1)以下の内容を織り込んだ。

- (1) 凝固収縮による欠陥体積を充填体積(製品+ガス抜きランナー)の2%と見込んで、加圧ピン径、加圧ピンストロークを設定した
- (2) ランナー加圧による押し湯効果をキャビティ内へ効率良く伝達するため、ゲート厚さを4mmとした
- (3) ランナー加圧により補給される溶湯がビスケット側に逆流しないよう、ランナー部に厚さ0.8mmの逆流防止溝(狭窄部)を設けた(図3-2)
- (4) ゲート断面積の設定はランナー加圧が有効に効く充填時間において、溶湯と酸素が効率良く反応するゲート速度になるよう考慮した
- (5) 未反応酸素がキャビティ内に残らないよう、ゲート断面積の約50%にあたるガス抜き断面積を確保した



図3-1. 金型方案

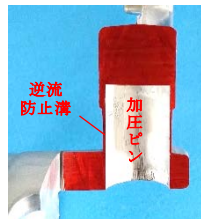


図3-2. 逆流防止溝

従来の層流充填ダイカストと比較して方案部のスリム化が図れ、鑄込み重量は35%の低減となっている。

3.3 ランナー加圧条件

基本的な鑄造条件を設定したのち、始めに酸素の吹込みをせずにランナー加圧条件のみを調整し、製品重量の増加量でランナー加圧の適正条件の確認をした。加圧ピンの推力は300MPa、加圧開始タイミングを高速射出切り換え位置から0.1秒と0.3秒遅延させて鑄造した結果を図3-3に示す。

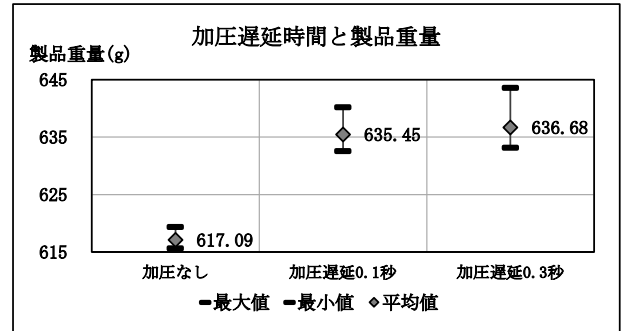


図3-3. 加圧遅延時間と製品重量

製品重量はランナー加圧をすることで約3%増加した。重量の最大値、最小値、平均値は、加圧遅延時間0.1秒よりも0.3秒の方が良い結果を得られた。加圧のタイミングが早過ぎると加圧後に若干の凝固収縮があるか、加圧中に図3-2の逆流防止溝の凝固が遅く、加圧により補給される溶湯がビスケット側へ逆流している可能性がある。ただし、0.3秒の場合重量のばらつきが大きいことも分かった。

ここで、加圧ストロークと製品重量について調査した。図3-4のように加圧ストロークと製品重量には強い正の相関があることが分かった。

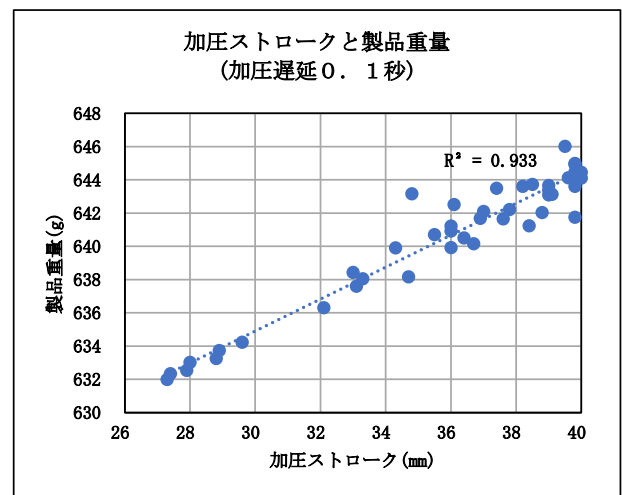


図3-4 加圧ストロークと製品重量

そこで加圧ストロークを安定させることに着目してトライを継続したところ、図3-5のように射出増圧を使わない方が加圧ストローク、製品重量ともに安定することがわかった。これはランナー部にかかる鑄造圧

力、もしくは増圧によりランナー加圧ピンとブッシュの隙間に発生する微細なバリが、ランナー加圧ピンの前進動作を阻害しているためと推測される。増圧射出がない状態でも製品内部のポイド率に差異がなかったことから、ランナー加圧法は鋳造機ダウンサイジングに寄与する工法であると言える。

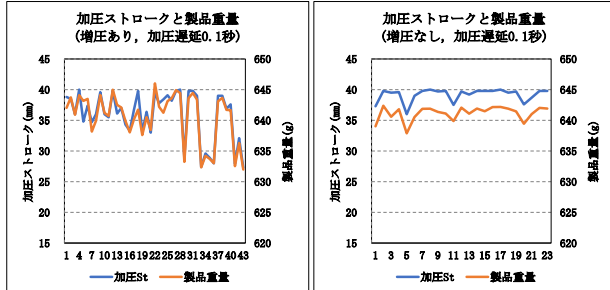


図 3-5

増圧射出の有無と加圧ストローク及び製品重量

なお、1回目のトライで酸素供給用バルブを動作させるピストン機構部と加圧ピンを連結するボルトが破断した。加圧ピンが後退する際の引き抜き抵抗に対してボルト強度が足りなかったと考えられたので、2回目のトライ以降に連結ボルト径のサイズアップを実施したところ、この不具合は解消した。



図 3-6 連結ボルトの破断

ランナー加圧法においては、加圧ピンの前進によって動いた溶湯がピケット側に逆流することなく製品側へ補給されることが望ましいため、図 3-2 に示した逆流防止溝部の溶湯を速やかに凝固させてメタルシールすることが重要であると考えられた。ただし、本工法では加圧ピン内部に酸素供給機構があるため、加圧ピンの内冷回路が設けられない。そこで図 3-7 のような外冷により加圧ピンを冷却し、加圧ピン温度の加圧効果への影響を調査した。その結果、加圧ピンの温度が低いほど製品重量は増加することが実証され、安定した内部品質を維持するためには、加圧ピンの冷却と温度管理が重要であることが分かった (図 3-8)。

ただし、外冷による冷却は効果があるものの、キャビティ内に水分が残ることにより製品内ガス量が増加する懸念がある。高品質のダイカストを安定生産する観点から、逆流防止溝部を金型側から内冷する冷却リングを考案し、共同出願中である。



図 3-7
スプレーによる外冷

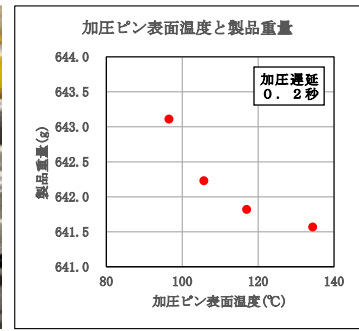


図 3-8
加圧ピン温度と製品重量

その後、加圧開始タイミングと前進速度、加圧ピンの推力 (アキュームレーター圧力) などを調整しながら適正条件を導出した。ランナー加圧最終条件での製品重量、ポイド率は図 3-9 のようになった。

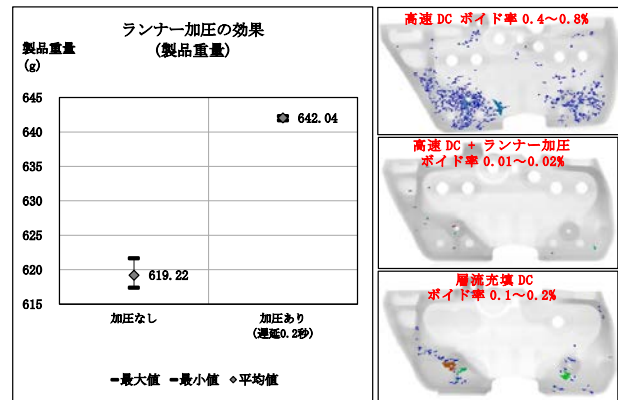


図 3-9 ランナー加圧と内部品質

製品の比重についても調査を実施した。図 3-10 で示したように、製品比重はランナー加圧をしないものと比較して 1.4% 向上していることが確認できた。ただし製品重量は 3.8% 増加しており乖離が発生している。製品の型割方向での寸法を測定してみると加圧した製品は 0.2~0.3mm 厚くなっており、バリも発生していた。高压で加圧することで金型のひずみが発生していることが予測される。この現象は 2022 年の日本ダイカスト会議でも報告されている²⁾。このことから、製品重量は製品の内部品質に対してニアイコールではあるがイコールではないと判断できるので、量産時の日常管理では内部品質規格に応じて重量と厚さ寸法の両方を管理することが重要になる。

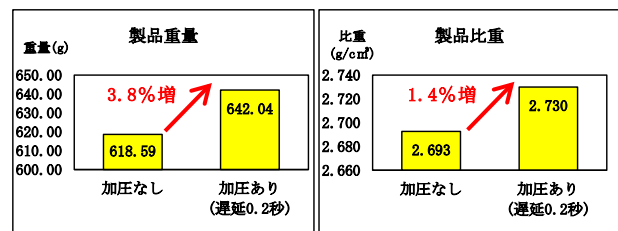


図 3-10 ランナー加圧による製品重量と比重増加量

3. 4 酸素吹込み条件

次に、ランナー加圧の加圧遅延時間を0.2秒に固定した上で、酸素吹込みにおける最適条件について確認した。

その動作は前述の図2-1で示したように、まず型締め開始より加圧ピンユニットを前進させて、その先端の酸素バルブを型締め完了直前から型締め完了まで開いて、酸素を金型キャビティ内に吹き込む（以降、1段目吹込み）。その後、酸素バルブは開いたまま加圧ピンユニットを後退させて射出スリーブ内に酸素を吹込み空気と置換する（以降、2段目吹込み）。

調整すべき条件は、

- (1) 型締め動作中、完了後の1段目吹込み時間
- (2) 1段目吹込み流量
- (3) 2段目吹込み流量

となり、各々の条件およびその組み合わせによる製品内含有ガス量を、ガスクロマトグラフの測定結果で比較した。条件と測定結果を表3-2に示す。

表3-2 酸素吹込み条件と製品内ガス量

No.	1段目				2段目				総ガス量 (cm ³ /100gAl)	N ₂	H ₂	I	C系
	型締め完了前 吹込み時間 (sec)	型締め完了後 吹込み時間 (sec)	前時流量 (L/min)	空間体積比 (吹込み量/1/37-7体積)	吹込み時間 (sec)	前時流量 (L/min)	空間体積比 (吹込み量/1/37-7体積)	総ガス量 (cm ³ /100gAl)					
①	2.2	2.8	58	14.091	2	58	1.543	2.88	0.39	2.03	0.46		
②	3.5	1.5	58	14.091	2	58	1.543	2.46	0.40	1.75	0.31		
③	1	4	58	14.091	2	58	1.543	2.64	0.52	1.74	0.38		
④	2.2	1.8	58	11.237	3	58	2.314	2.90	0.62	1.92	0.36		
⑤	2.3	2.7	58	14.091	2	58	1.543	2.44	0.35	1.76	0.32		
⑥	2.2	2.8	35	8.503	2	58	1.543	2.52	0.35	1.83	0.33		
⑦	2.2	2.8	58	14.091	2	90	2.394	2.15	0.21	1.66	0.28		
⑧	2.2	2.8	58	14.091	2	30	0.798	2.50	0.43	1.77	0.30		

酸素を吹込まない場合のガス量は11cm³/100gAl以上出ており、酸素を吹込んだ際のガス量は2~3cm³/100gAlに改善されている。N₂ガスの大半は酸素と置換できており、その他のガスではH₂ガス（水分）が70%を占めている。H₂ガスはC系ガス（油分）とともに溶湯に触れて初めてガス化するため、酸素と置換できない離型剤の水分残りや金型表面に形成された離型有効成分の被膜から発生するガスだと推測できる。本部品は10%希釈の水溶性離型剤を少量吹きしたが、今後さらに乾燥性が良く少量でも付着性の良い離型剤の開発や、離型剤の量そのものを減らせるような金型材料と表面処理の進歩、3D積層金型などによる外冷不要な金型内冷回路などが必要になる。

酸素吹込み条件では、2段目の吹込み量を射出スリーブ容積の約2.4倍にしたものでわずかにN₂ガス量が減少した。ただし、その後のトライで吹込み量を3倍以上にしたサンプルではT6処理後のプリスター発生率が増加する結果となった。サンプル数が少ないためメカニズムが明確になっておらず、酸素吹込み条件に関しては継続して調査が必要である。例えば、CAE解析で金型内での酸素気流解析ができればさらに有効であると考えられる。

また、酸素吹込みの有無で製品重量に大きな変化は

なかったが、図3-11に示すようにポイド率と製品比重では若干の品質向上が見られ、図3-12のようにT6処理後のプリスター発生率に対しては大きな効果が得られた。

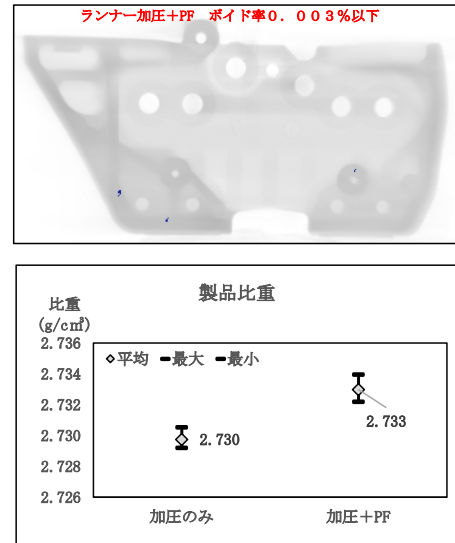


図3-11 ポイド率と製品比重

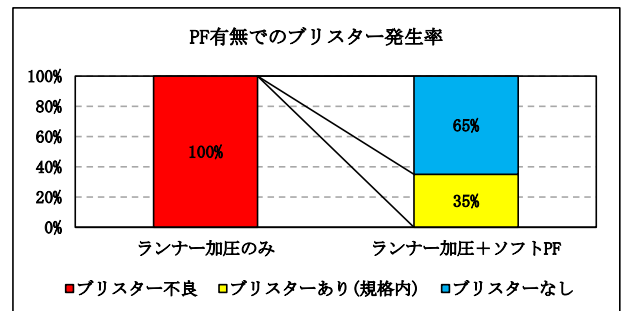


図3-12 T6処理後のプリスター発生率

トライ中、酸素バルブ機構に溶湯が入ってしまいバルブに設けた酸素供給穴が詰まってしまうトラブルが数度発生した。調査の結果、加圧ピンと酸素バルブの間にバリが差し込むことが原因であることが分かり、バルブの硬度および加圧ピンとのはめあい代の長さを見直して対策したところ以降同様のトラブルは発生しなかった。ただし、今後量産を重ねていく中でバルブや加圧ピンの交換基準は明確にしていく必要がある。

図3-12の品質規格内のプリスター発生率は、溶湯のゲート通過速度を上げて、ゲートから流入する溶湯粒子の微細化を図り、空隙を分散させたことで最終条件では5%以下に抑えられている。

3. 5 強度

ここまでで新工法によってアルミダイカストの内部品質向上ができる確証が得られたので、機械的強度の確認をした。

まず、製品として指示されている破壊試験方法で従

来の層流充填ダイカスト品との強度比較を実施した。結果を図3-13に示す。

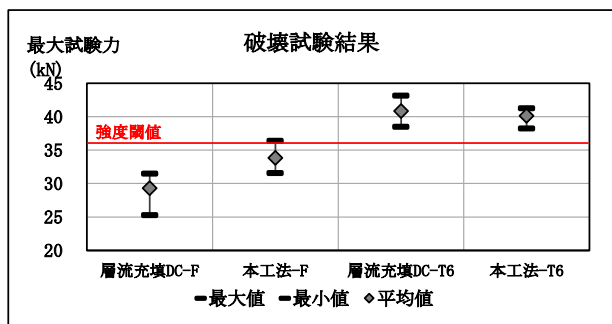


図3-13 破壊試験結果

T6処理前では従来品よりも高強度であるという結果が得られた。ただし、T6処理後の強度では差異が見られなかった。これはT6処理後の強度は内部の品質状況よりも、T6処理の影響が大きいためと考えられる。本部品においては、T6処理をする前提で製品機能を満足するため、工程変更を客先に申請中である。

次に製品からJIS:Z2241の14B号試験片を切り出して引張試験を行った。なお、今回の試験片は板厚方向も切削加工により黒皮面を除去している。



図3-14 14B号引張試験片

試料は、

- (1) 通常ダイカスト品 (加圧, PFなし)
- (2) ランナー加圧品, 射出増圧なし
- (3) ランナー加圧品, 射出増圧あり
- (4) ランナー加圧+ソフトPF品, 射出増圧あり

の4種類とした。引張強度の測定結果を図3-15に示す。通常ダイカスト品と比べランナー加圧品では平均値, 中央値共に大きく向上しており, 新工法品はさらに向上している。通常ダイカスト品と比較して, 強度の中央値は34%向上した。

ただし, 極端に強度の低い試料が8つの試験片のうち1つで確認された。この試験片の破面を観察してみると, 比較的大きな破断チルが起点になっていることが分かった。他の試験片でも小さな破断チルを起点に破断している試料が確認された。本工法により鑄巣欠陥による強度のばらつきは対策できているが, 破断チルに対しては射出スリーブの温調やコーティングの変更など別の対策が必要になる。

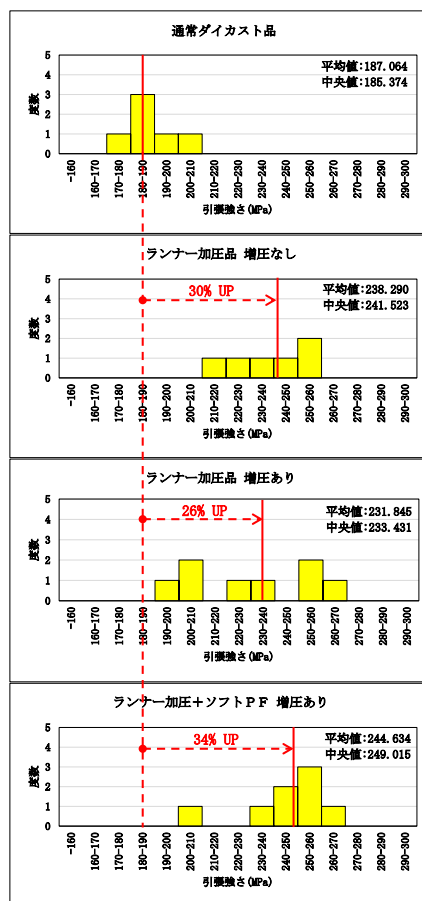


図3-15 引張強度測定結果

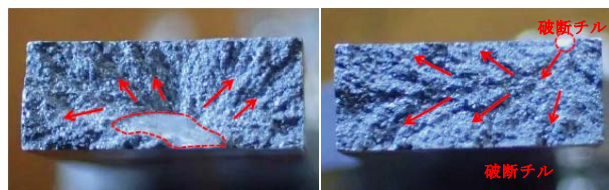


図3-16

ランナー加圧+ソフトPF引張試験片の破面 (左:209MPa, 右:255MPa)

3.6 付帯効果

従来の層流充填ダイカストからランナー加圧とソフトPFを組み合わせた新工法に切り替えるにあたり, 付帯効果を表3-3にまとめる。

表3-3 新工法付帯効果

	層流充填ダイカスト	本工法	影響
鑄込み重量	1,855g	1,205g	溶解費減
製品重量	650g (取付け穴一部無垢)	640g (取付け穴鑄抜き)	溶解費減 切削加工費減
鑄造サイクルタイム	52秒	40秒	出来高向上 設備稼働時間減

特に層流充填ダイカストと比較して, 方案部の重量を減らすことができるので材料溶解に費やすエネルギーの低減につながり, カーボンニュートラルに向けた活動の一方策として大きな効果を出すことができた。

4. 量産に向けて

4. 1 機能の維持管理

本工法においては、ランナー加圧ピンの安定した摺動性の維持や酸素供給量の管理が重要になる。

特に加圧ピンユニットは金型整備の際に取り外して、摩耗確認や付着アルミの除去を実施しなければならない。本金型は大径のランナー加圧ピンが金型下部の分流子に設置されており、分流子に固着した加圧ピンをスライディングハンマーなどを使用して定期的に金型から取り外す作業は非常に重労働である。

そこで、金型から加圧ピンユニットを簡単に取り外すことができるよう、図4-1のような逆バイスを模した工具を製作し、加圧ピンの取り外し作業を容易にできるようにした。



図4-1 加圧ピン引き抜き工具

また、酸素の吹込み量については本工法の装置に取り付けられた気体流量計で毎ショットの酸素ガス流量を測定し、不良品判定や装置異常を出力できるようにした。

4. 2 今後の課題

以下を今後の課題として挙げる。

- (1) 製品への破断チル混入対策
- (2) ランナー加圧の高加圧力による可動主型のひずみに対して可動主型の剛性を向上させる。また、タイバーへの影響も含めて長期的に調査、評価する必要がある
- (3) ランナー加圧ピン、酸素供給バルブは消耗品であり、より安価な造りの検討や長寿命化のための方策が必要になる
- (4) 酸素吹込み量は今後も最適条件を迫及する必要がある
- (5) 離型剤から発生するガス (H_2 , C系) 低減の更なる改善が必要
- (6) 酸素供給バルブの後退端確認に高精度タッチスイッチを使用している。タッチスイッチの堅牢性に難があるので、よりトラブルの少ない後退端確認方法の検討が必要になる

5. まとめ

- (1) ランナー加圧法とソフトPF法を組み合わせた本工法によって、鑄巣欠陥の少ない高強度なアルミダイカストを量産できる目途付けができた。また、本工法では引張強度が従来法に比べて約34%増加するという驚くべき結果が得られた。今後、試験サンプル数を増やしての調査やT6熱処理廃止に向けた取組みを継続していきたい
- (2) ランナー加圧法では射出増圧なしでも内部品質の優れたダイカストが生産可能なことがわかった
- (3) 本工法により、中小型機でダイカストする部品の内部鑄巣の問題はその多くが解決可能であると考えられる。大型機への展開はより大径の加圧シリンダに対応した装置の製作が必要となる。また、射出中に発生する破断チルの対策は必須となる

6. おわりに

長い歴史のあるコールドチャンバーダイカストであるが、その強度のばらつきから未だに製品強度のJIS規格化がなされていない現実がある。ランナー加圧法とソフトPF法を組み合わせ、ひけ巣とブローホールを同時解決する新しい本工法は、巣のない高強度ダイカストを量産できる技術として、JIS規格化実現に寄与する大きな一歩になることが期待できる。今後量産を進めながら残された課題に対して継続的に開発、改善を進め、それを実現できるように進めていきたい。

7. 謝辞

引張試験片の破面観察においては、サトウ鑄造技術研究所の佐藤健二氏に御協力いただきました。多大なる御協力に深く感謝申し上げます。

8. 参考文献

- 1) 西村, 安徳, 岩本, 則包, 長澤, 谷口, 2022年日本ダイカスト会議論文集 JD22-19
- 2) 水草, 上田, 福岡, 中田, 長澤, 2022年日本ダイカスト会議論文集 JD22-22