

マグネシウム真空ダイカスト 鑄造ホイールの開発

Development of Magnesium Vacuum Die-cast Wheels

塚本 健二 小倉 純一 稲村 隆義 下位 誠

要旨

マグネシウムは実用金属中の材料比強度がもっとも高く、密度は鉄の約 1/4、アルミニウムの約 2/3 と非常に軽いことから、近年求められている車両の軽量化には欠かせないものとなっている。また、二輪車のホイールには軽量化とともに高い意匠性も要求される。材質をアルミニウム合金からマグネシウム合金へ置換し、従来の重力鑄造法ではなく、当社の固有技術である真空ダイカスト鑄造法を採用することにより、商品性と量産性を高次元で両立させたマグネシウム真空ダイカストホイールの開発に成功した。これにより、従来の重力鑄造法によるアルミホイールと比較して、フロントホイールで 530g、リアホイールで 340g の軽量化に成功した。また、フロントホイールで 4%、リアホイールで 11% の慣性モーメントの低減を達成し、操縦安定性の向上に大きく寄与している。

Abstract

Magnesium has the highest material strength among all practical metals, and is extremely light, with a density of approximately 1/4 of steel, and 2/3 of aluminum. It is an essential part of the weight reduction demanded of vehicles in recent years. In addition, motorcycle wheels are required to be both light in weight and have excellent designability. By changing the materials used from aluminum alloy to magnesium alloy, and changing the technology used from the conventional gravity casting method to Yamaha Motor's proprietary vacuum die-cast method, we have succeeded in developing magnesium vacuum die-cast wheels with both highly-attractive product attributes and excellent mass producibility. Compared to aluminum wheels made with the conventional gravity casting method, we have produced magnesium vacuum die-cast wheels which are 530g lighter for the front wheel and 340g lighter for the rear wheel. By doing so, we have also reduced the moment of inertia by 4% for the front wheel and 11% for the rear wheel, significantly contributing to increased handling stability.

1 はじめに

当社は、2008 年型「YZF-R6」向けにマグネシウム真空ダイカストリヤフレームを開発し、市場に投入して以来、スーパースポーツのカテゴリーでは積極的にマグネシウム合金を採用している。車両の戦闘力が飛躍的に進歩を遂げたフラッグシップモデルである 2015 年型「YZF-R1」(図 1)には、いくつもの軽量化技術が織り込まれている。「特にホイールを軽くしたい」という開発陣の熱意を強く感じ、その熱意に応えるためにマグネシウムダイカストの生産工場がある森町工場にちなんで付けられた、我々チーム「MORIMACHI ● JAPAN」は、当社の固有技術であるマグネシウム真空ダイカスト法を熟成させることにより、従来量産が困難であったリム幅 6 インチ、リム径 17 インチの大径かつ幅広なマグネシウム真空ダイカストホイールの量産を可能にした(図 2)。従来品との比較表を表 1 に示す。本報告では、マグネシウム真空ダイカストホイールの開発に際し直面した技術課題と解決手法について述べる。



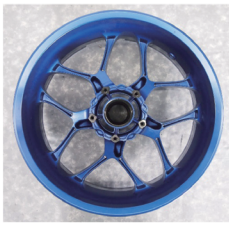
図1 2015年型「YZF-R1」



図2 マグネシウム真空ダイカストホイール

※完成品のスポークには、我々の自信と誇りを示す「MORIMACHI ● JAPAN」の文字を施した。

表1 従来品と開発品との仕様比較

	従来品 Previous product 2014 YZF-R1	開発品 Developed product 2015 YZF-R1
製品形状 Product form		
材質 material	AC4CH-T6	AM60B-F
工法 method	金型重力鋳造 Gravity casting	真空ダイカスト High vacuum Die casting
表面処理 surface treatment	塗装2コート 2coat Painting	塗装3コート 3coat Painting
重量 weight	3995g (Fr) / 4928g (Rr)	3465g (Fr) / 4588g (Rr) ▼530g / ▼340g
慣性モーメント internal moment	0.133 (Fr) / 0.129 (Rr) Kg・m ²	0.108 (Fr) / 0.114 (Rr) Kg・m ² ▼4% / ▼11%

2 安定生産に向けた工法確立

2-1. 3枚型構造

マグネシウム真空ダイカストホイール用の金型は、3枚型温調構造を採用している。製品のリム形状部は4方向スライドにより形成し、ガス抜きのためのベントも2方向に設置している。型構造が複雑なため、開発段階では金型の温調温度を高温側に設定すると、中間停止位置で中間型と可動型の温度差や中間型の自重による垂れもあり、ガイドピンの摺動不良やスライドの固着が発生して金型が開かず連続鋳造ができない課題があった。

そこで、中間型と可動型のガイドピンを丸型ガイドピンから角型ガイドブロックに変更することで、中間型と可動型が開くときに抵抗がかかる方向を限定し、中間停止位置で金型が開かなくなる現象を対策した。これは、ダイカストマシンに対し、スリーブインロー部分で固定された金型が固定型と可動型がそれぞれ温度差を持って熱膨張したときに、スリーブを中心として放射状に膨張すると考えた場合、図3に示すように一般的なガイドピンの配置をすると、ガイドピンとガイドブッシュは熱膨張の差分で寸法差が生じそれらが線状に接触するため、固着が発生しやすくなる。そこで、図4に示すようにガイドピンを角型ガイドブロックとし、金型の伸縮方向と直角となる側へガイド板を取り付けることにより、金型の膨張に逆らわずガイドとしての役割を面状の接触とすることで、面圧を低下させ固着を防止した。また、中間型が自重で垂れてしまう現象に対しては、固定型の下面に中間型の重さを支えるためのガイドレールを設置して対策した。

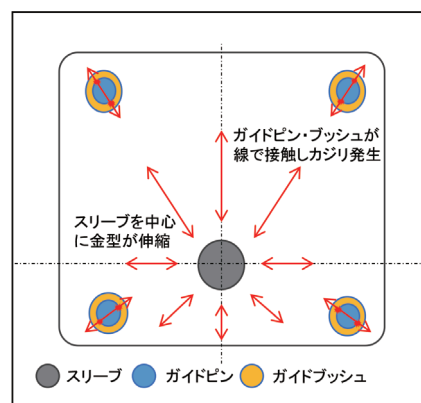


図3 金型の熱膨張モデル(ガイドピン仕様)

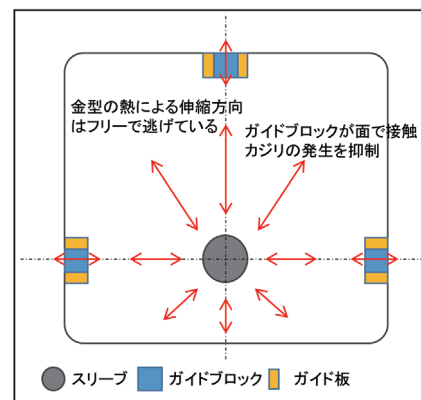


図4 金型の熱膨張モデル(角型ブロック仕様)

また、リヤフレーム開発時の知見より金型真空度と機械的性質に関係があることがわかっているため、金型真空度を確保し、製品全体で安定して強度を確保できる構造を検討した。金型真空度と強度の関係を図5に示す^[1]。3枚型の真空ダ

イカスト金型を設計するにあたっては、必要な部分に耐熱シールを配置、真空系統を複数用いて真空度を確保し、シール位置の最適化を重ねた。さらに真空引き体積を最小化するように、金型の可動部分を小さく設計して真空引き時間の短縮も行っている。金型の構造を図6に示す^[2]。

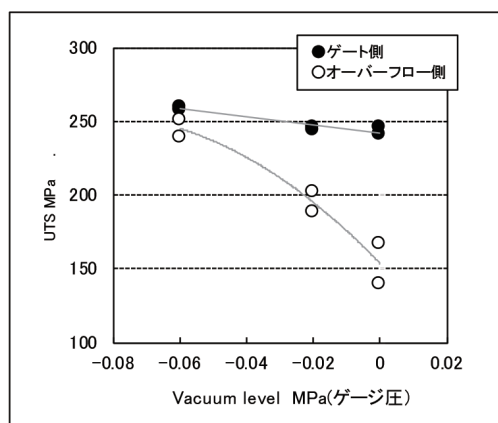


図5 AM60B真空ダイカスト材の真空度の違いによる機械的性質

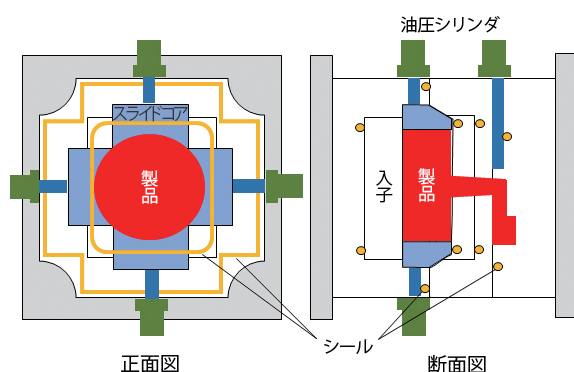


図6 マグネシウム真空ダイカストホイール金型の3枚型構造

2-2. 温調経路設計^[3]

一般的にマグネシウム部品を生産するダイカスト金型では、熱媒体油を加熱し、金型内部へ循環させて金型を昇温する方式が採用されている。マグネシウム真空ダイカストホイールは複雑な3枚型構造であるため、熱解析を併用した温調経路の最適な配置により、金型全体の温度バランスを保つことでアルミニウムと比べて体積比熱の小さなマグネシウムダイカスト合金でも同等の流動長を確保している。また、温調機により鑄造開始前に金型温度を昇温しておくことで、捨て打ちの数を減らすことができるとともに品質の安定化につながる。一方で、金型の構造や製品形状によっては温調経路に制約がでてしまうため、金型全体を均一に温度調節

することが困難となる場合がある。そのような状況を未然に防ぐことが重要であり、そのためには解析による予測を行い、計測による検証結果をフィードバックすることで金型の各部の温度予測精度を上げておくことが役立つ。

今回開発したホイール金型は構造が複雑であったため、温調経路の決定には多くの労力を費やした。第一世代の金型ではスポット温調を多用したが、鑄造中の金型温度をバランスよく制御できなかった。そこで、温調経路の本数や位置、深さ、穴径を改善し、ライン温調やバッフルプレートを使用して可能な限り均一な温度バランスになるようにした。一部には水冷却を採用して金型温度の均一化を図った。特に、鑄造方案上のゲートとなるセンターピンの冷却では、冷却水流量、入り側、戻り側の冷却水温度を測定し、1ショットあたりの抜熱量を測定している。図7に示すように、第一世代の金型では一部300℃を超える部分がある一方で、150℃以下の部分も存在しているが、改善後は入子全体が220℃～260℃の範囲となり、適温とされる温度域に保つことができています。

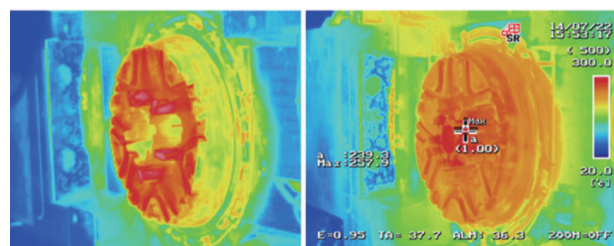


図7 鑄造中の金型温度の測定結果
(左:改善前 右:改善後)

2-3. 安全への取り組み

マグネシウムは燃えやすく、危険であるという先入観が一部にある。一般的な性質として、大気中でマグネシウム合金を溶解すると、湯面より自然に燃焼して酸化マグネシウムを形成する。仕上げ工程で出る乾燥した微細なマグネシウム粉末は、着火源があると容易に着火し、緩やかに燃焼する。また、適度の水を含んだ加工切粉は着火源があると容易に着火し、水を分解して水素と酸素を発生し激しく燃焼する。このように、マグネシウムはその形状や保管方法によっては燃えやすく、取り扱いを間違えると火災のリスクがある合金であるため、我々は細心の注意を払って工程設計を行っている。

鑄造工程では、ダイカストマシンより取り出した製品の方案部分をプレス機や手作業によって除去しなくてはならない。アルミニウムダイカストホイールのセンターゲート方案部分

はコンターマシンにより鋸切断で除去しているが、マグネシウムで同様に鋸切断した場合、大量のマグネシウム切粉が発生してしまい安全上好ましくない。そこで、銅製パイプを切断するパイプカッターをヒントに、切粉をほとんど出さずにセンターゲート方案部分を切断できるゲートカッターを開発した（図8）。センターゲート部分にカッター刃を押し当てながらカッター刃自体を回転することにより、製品をクランプすることなく切断箇所も隠れ、安全性が確保できる。また、切断した方案部分と少量の切断屑がリターンパレティーナへ自動回収されるため、安全にマシンサイドで切断することが可能となった。今回開発した切断機とコンターマシンとの性能比較を表2に示す。



図8 ゲートカッター

表2 切断機とコンターマシンの性能比較表

		今回開発した ゲート切断機	コンターマシン
安全性	1個切断あたりの 切削屑発生量(g)	0.02	2.32
	オペレーターの 怪我のリスク	なし	あり
作業性	清掃頻度	1回/1直	1回/10shot
	サイクルタイム(s)	15	25
	切断位置ズレ(mm)	±1	±2
	刃の耐久性(個)	約 8000	約 5000

また、後述するが、離型剤塗布方法を油性離型剤による静電塗布に変更するにあたっては、スプレーノズル先端へ高電圧をかけることから、離型剤に引火することがないように生産の状況を想定した安全性の確認を行った。実際に油性離型剤を塗布している状況下で、静電塗布装置によるスパークを近づけたが引火はしなかった。さらに、バーナーによる裸火を近づけたが引火はしなかった。このように、引火する危険性がないことを確認できたが、量産時は、段取りごとに

金型のアースチェックを実施して帯電防止を図っている。また、設備側でも静電ガンに異常がないかを常時確認しており、過電流の発生や出力電流変化量に異常がないかを監視している。

仕上げ工程では、乾燥した微細なマグネシウム粉末が発生するため数々の安全対策を施している。基本的な考え方である「微細なマグネシウム粉末を溜めない」を念頭に置いている。休み時間、終業時の清掃を徹底して行うことで、仕上げにより発生する微細なマグネシウム粉末を溜めないよう管理している。また、静電気には注意を払っており、仕上げエリアゲート、作業台にそれぞれイオナイザーを設置して帯電防止を図っている。また、ツールにはアース線を繋ぎ、仕上げ作業中にツールが当たったときに火花が出ないように、作業台や治具類をゴム板や木材、アルミ材で構成している。このように、安全のリスクレベルが高い部位は事前に対策を行っている（図9）。その結果、仕上げエリアでの火災などによる事故は工場立ち上げ以来「ゼロ」を継続している。

加工工程では、クーラントの水分が付着している切粉が多く発生するため、着火源があると容易に着火し、激しく燃焼してしまう危険性が高い。水分の付いた切粉は、水素を発生するため、反応して発生した水素が溜まらないようにチップコンベアの上部に孔を開けている。チップコンベアから出た切粉を回収するのは、帯電防止のボックスとしている。また、回収された切粉は、一定量溜まった段階で加熱遠心分離装置により水分を除去して安全性を確保している。

安全教育として、生産部門では実際にマグネシウムの乾燥切粉やバリ、クーラントが付いた湿った切粉を燃焼させてマグネシウムの形状や状態による燃焼の仕方を確認し、それぞれを水や乾燥砂、金属消火器、フラックスを使用して消火する訓練を定期的に行っている。少ない切粉でも水を使って消火した場合、激しく燃焼することを体験させ、注水厳禁であることを確認している（図10）。また、金属消火器や乾燥砂を使い窒息消火させた場合は、完全に鎮火するまでに時間を要することを体験させる。このような訓練を行うことで、適切な初期消火の大切さを実感させて安全への意識を常に高めている。



図9 仕上げ作業台



図10 放水による燃焼体験の様子

3 品質課題への対策

3-1. 湯じわ対策

ホイールは、かねてから生産していたリヤフレームと比較して流動長が長く製品形状が複雑なため、離型剤を塗布する面積が広く、スプレーロボットを教示するポイントも多かった。そのため、開発当初は油性離型剤を 20cm^3 以上塗布し、部分的に水による外冷を併用しないと製品にトラレやカジリが発生して連続して鑄造することができなかった。このため、リム部の湯じわの発生率が高かった。対策として、離型剤の量を減らして塗布しようとする、ノズルの調整が難しく塗布量が安定しなかった。このように、湯じわ対策のためには離型剤の塗布方法を改善する必要がある。

そこで、まずは塗布ノズルの変更を行った。加工精度がよく、パネレートが改良された流量の微調整が可能な GP ノズルへ変更して少量塗布時の塗布量を安定させた。さらにピンポイントで離型剤を塗布できるように、ノズルの先端部分を形状変更して 10cm^3 程度まで塗布量を減らすことができた。

しかし、リム部の湯じわの発生率は依然高く、外観不良や湯ジワの貫通による圧漏れ不良につながる恐れがあった。また、湯ジワ対策としてやみくもに離型剤の塗布量を減らしてしまうと、塗布したい金型の縦壁部分へ十分に離型剤を付着させることができず、カジリや変形等の弊害も発生して両立させることが難しかった。そこで、離型剤の塗布方法を、金型の縦壁へ有効に離型剤を塗布することができる静電塗布に変更して、さらに塗布量を減らすことを試みた。離型剤塗布量の推移を図 11 に示す。

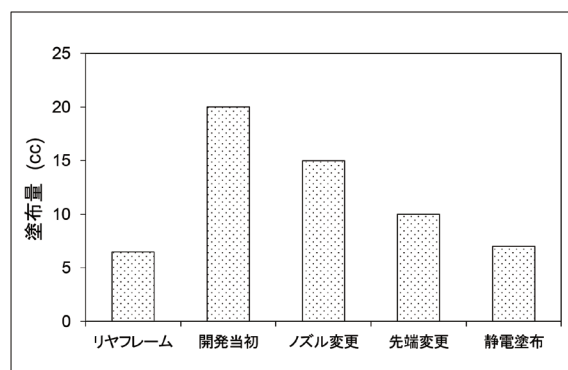


図11 離型剤塗布量の推移

塗布方法を静電塗布に変更することにより、塗布量を減らすことができたが、湯じわの発生メカニズムを完全には把握できていなかった。その原因を調査した結果、静電塗布に変更すると、塗布しなくていいところにも離型剤が塗布されてしまい、そこに付着した離型剤が弊害となり湯じわを発生させていることがわかった。そこで、離型剤内の有効成分量を減らしたところ、湯じわの発生を抑制しつつカジリや変形の発生をなくすことができた (図 12)。さらに、どの位の塗布回数で品質に影響が出るのかを調査し、定期的な金型の清掃を実施している。このように、塗布方法の改善と離型剤成分の調整、金型の定期清掃を実施することで、必要な場所へ必要な量の離型剤を塗布し、その状態を維持管理することにより安定した生産が可能となった。

また、湯じわ対策のもうひとつの手段として、オーバーフロー体積の適正化を実施した。アルミニウムダイカスト合金と比較し、凝固速度が速いマグネシウムダイカスト合金は、より短時間で充填をする必要がある。オーバーフローは本来、製品の品質に悪影響を及ぼすスリーブ潤滑剤や離型剤を多く含む先湯が製品内へ留まることを避け、湯じわの原因となるキャビティ内で発生する溶湯合流部を製品から外へ排出する役目を担っている。開発当初は最終充填部位にオーバーフローを設置して試作を行っていたが、充填時間短縮による

鑄造圧力の立ち上がりを早くすることで湯じわの対策となることがわかり、ガス抜きランナー以外のオーバーフローをすべて止めることで可能な限り2次充填を抑制して湯じわを対策することが可能となった。

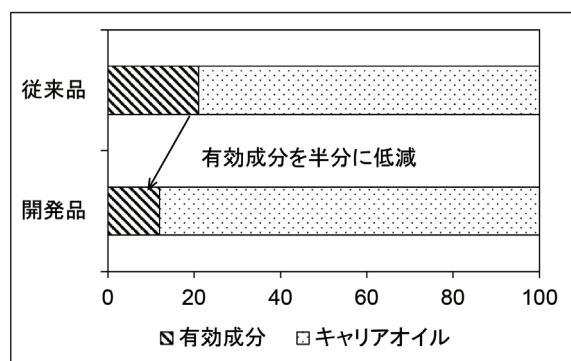


図12 離型剤内の有効成分量

3-2. 製品設計

マグネシウム鑄造の品質にとって重要な要素となる製品設計では、軽量化や強度といった設計要件だけでなく、流動性や凝固温度のバランスを考慮した製品形状の作り込みが必要となる。マグネシウム真空ダイカストホイールの材質であるAM60B合金は凝固温度範囲が比較的に広いこと、凝固割れの発生が予測された。そのため、製品設計の段階ではCAE解析により凝固温度バランスの最適化を図り、テスト型による形状の作り込みを実施した。湯口に近いハブ部分のテスト入子を製作、5方向に分岐する部分のリブ形状やRをそれぞれ変更し、どのような形状が凝固割れに対して有効であるかを検証した。その結果、湯口ゲート付近で広い平面形状となる部位には、収縮応力を緩和させるため、図13に示す収縮防止リブを設置した。これにより、湯口ゲート付近の凝固割れを防止している。スミR部には、シボ加工により突起形状を付与して表面積を増やしている。突起形状を付与することによるアンカー効果と表面積増加による凝固時間の短縮で、スミR部の凝固割れを防止している。ゲートから遠いリムに関しては、流動性向上を目的にディンプル形状を付与している。

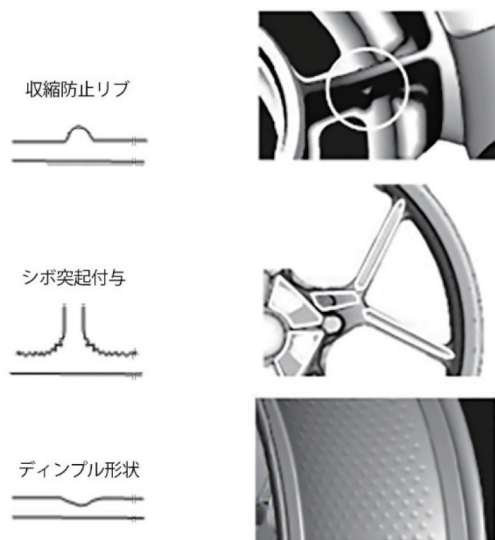


図13 ホイール設計時に採用した製品形状

製品設計でもうひとつ重要な要件として、寸法精度が上げられる。高速で回転するホイールの寸法精度や重量バランスは走行性能に直結するため、車の性能を決める重要な要素のひとつである。従来の重力鑄造で生産されるアルミホイールは、リムからビードシート形状は素材に加工代を設け機械加工により成形されるため、設計寸法通りの精度が確保できるのに対し、マグネシウムダイカストホイールの場合は加工面からの圧モレのリスクが懸念されるため、ビードシート部分は機械加工せず素材のまま使用する。よって、鑄造品の寸法精度がそのまま完成品の寸法精度となる。このため、素材の段階で寸法精度を確保する必要がある。ビードシート部の寸法精度を確保するためのポイントは、適正な縮み代の設定と4方向スライドの合わせ調整の2点が挙げられる。ダイカストの縮み代は、製品取り出し時の金型温度と製品の温度、製品の金型への拘束状態などによって決まる^[4]。ダイカストホイールの場合は、先に型が開き、金型への拘束が開放される中間側と最後まで金型で拘束される可動側とで製品取り出し時の温度と拘束状態の違いによる寸法差の発生が予測されるため、それぞれに縮み代を設定する必要がある。今回開発したマグネシウム真空ダイカストホイールでは、試作型の造り込み段階で中間型側と可動型側のビードシート部分の寸法差は直径でおよそ0.3mmであった。これは、ビードシート部分の周長が約1mm相違することとなる。試作品の造り込み段階において、金型の温度と型の開くタイミングで寸法精度を確認し、生産型製作時に金型へ補正値を織り込むことで量産品の寸法精度を確保している。また、製品のリム肉厚を形成する4方向のスライド入れ子部分は、金型製作時の公差の積み上げや製作時の合わせの調整を経て

鑄造を行うと、通常の鑄物の公差範囲内で肉厚差が発生する。この肉厚差はそのまま重量バランスとなって走行性能に直結する。そのため、鑄造品の寸法を測定し、各入れ子を1/100mm単位で再度合わせて調整を行った。これによりホイール単品での重量バランスを改善し、操縦安定性を向上させた。

4 まとめ

マグネシウム真空ダイカストホイールの開発に際し、商品性と量産性を両立させる上で直面した技術課題と解決手段について述べた。

- 大型真空マグネシウムダイカストホイールの3枚型構造は、温度による伸縮に追従できる金型構造とすることが重要である。
- 最適な温度バランスを保つことのできる温調経路設定により、安定した型温で連続鑄造が可能となる。
- マグネシウムダイカスト製品の工程設計において、安全性が確保できる設備選定、教育体制が安定した生産活動の一助となる。
- マグネシウムダイカストの湯じわ対策として、離型剤の少量塗布とオーバーフローの最適化が有効であった。
- マグネシウムダイカストの製品設計において、凝固温度バランスを考慮した製品形状の作り込みと寸法精度を担保する金型設計が重要である。

5 開発の成果

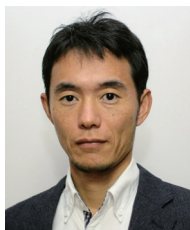
今回の開発により、リム幅6インチ、リム径17インチという大型のマグネシウム真空ダイカストホイールの量産化に成功した。従来のアルミ重力鑄造品と比較して、フロントホイールで530g、リヤホイールで340gの軽量化を達成した。また、慣性モーメントはフロントホイールで4%、リヤホイールで11%の低減を達成している。これらの結果は、車両の操安性向上に大きく寄与すると同時に、目標であった車両重量200kg以下の達成に貢献している。

最後に、本プロジェクトでは多くの方々の情熱にふれ、多大なご協力、ご指導をいただきました。ここに改めてお礼申し上げます。

■参考文献

- [1]鈴木 貴晴、稲波 純一、小池 俊勝:Development of the Magnesium Die-Cast Motorcycle Chassis IMA2008 pa-per (2008)
- [2]鈴木 貴晴、久保田 剛、橘内 透、浅野 峰生、高橋 一浩:Development of Motorcycle weight reduction technologies as World No.1
- [3]塚本 健二、鈴木 貴晴、小倉 純一、:アルトピア カロス出版 (2017 8) 10p
- [4]軽合金鑄物・ダイカストの生産技術 軽合金の生産技術教本編集部会 (1993) 394p

■著者



塚本 健二
Kenji Tsukamoto
エンジンユニット
コンポーネント統括部
生産技術部



小倉 純一
Junichi Ogura
エンジンユニット
コンポーネント統括部
生産技術部



稲村 隆義
Takayoshi Inamura
生産本部
EG製造統括部
EG製造部



下位 誠
Makoto Shimoi
生産本部
EG製造統括部
磐田第1製造部