

フラッグシップモデル「PW-XM」の軽量化技術 マグネシウムハウジング開発

Lightweight technology for the flagship model "PW-XM"
Development of magnesium housings

宇佐美 智文 松原 圭祐 水落 新 小原 裕司

Abstract

In November 1993, the world's first electrically power assisted bicycle, "Yamaha PAS" was released in Japan. Today, 30 years on from the release, in addition to engaging in the development and manufacturing of vehicles as finished products such as the "PAS" and "YPJ" series, the company also has a B-to-B business of supplying components to bicycle manufacturers - i.e. "power assist systems" - consisting of a drive unit, battery, and display (which are considered a central part of an electrically power assisted bicycle). Yamaha's OEM supply to bicycle manufacturers outside Japan began in 2013. In recent years, electrically power assisted bicycles have seen their international market expanding. They have been popularized as sports-type electrically power assisted bicycles ("eBikes") especially in Western countries, where bicycles have traditionally been a common means of transportation. The sales of eBikes in Europe are expected reach 17 million units a year by 2030^[1]. Not only more and more bicycle brands have been entering the eBikes market, but the number of companies developing and supplying drive units is also increasing. This heightens the need for further improving and differentiating our products. Against this background, we have developed a drive unit with industry-leading torque and weight properties.

1 はじめに

1993年11月、世界で初めてとなる電動アシスト自転車の「YAMAHA PAS」を日本で発売した。発売から30年経った現在、当社では「PAS」や「YPJ」シリーズといった完成車としての開発、製造以外にも、電動アシスト自転車の心臓部ともされるドライブユニット、バッテリー、ディスプレイで構成された「Power Assist System」自体をコンポーネントとして自転車メーカーへ販売する BtoB ビジネスも手掛けている。海外自転車メーカー向けの OEM 供給は2013年から開始した。

昨今、電動アシスト自転車は、特に自転車文化の盛んな欧米諸国で eBike と呼ばれるスポーツタイプの電動アシスト自転車として普及し、海外市場での広がりを見せている。欧州では、2030年までに eBike の販売台数が年間1700万台に達すると予想されている^[1]。

eBike を取り扱う自転車ブランドの増加だけでなく、ドライブユニットを開発、販売する企業の参入も増加しており、さらなる商品性の向上と差別化が求められている。

こうした背景から、業界トップクラスのトルクと重量を誇るドライブユニットの開発を行った。

2 開発の目的と狙い

「PW-XM」は2021年に発売した eBike 用ドライブユニットである「PW-X3」の上位互換であり、性能は落とさず、さらなる軽量化を図ったモデルである(図1)。



図1 マグネシウム合金を採用した「PW-XM」

ドライブユニットの軽量化競争は年々激しさを増し、近年はグラム単位レベルになり、トルク密度の高さが商品価値の一つになっている(図2)。

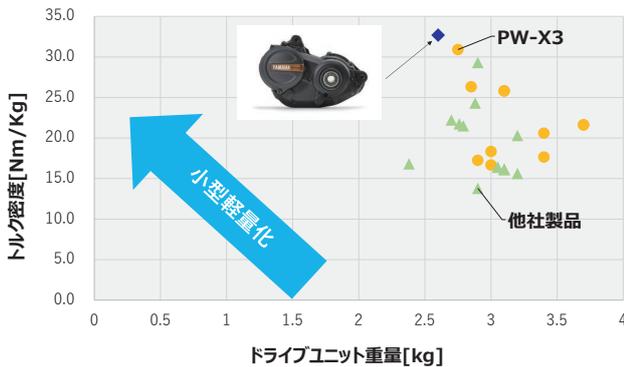


図2 ドライブユニット 重量／トルク密度マッピング

他社では実用金属の中で最軽量とされるマグネシウム合金（以降、Mg合金）をいち早く、筐体の材料として取り入れ、製品としてすでに市場投入している。

当社でも軽量化を実現するための手段として、本材料を筐体に採用することを検討した。

当社では、モーターサイクルのスポーツモデルにマグネシウム合金ダイカスト（以降、MgDC）ホイールを量産化しており、モーターサイクルで培った鋳造技術、加工技術のノウハウがあった。

製品としての軽量化ニーズと自社保有のシーズが一致したことで、内製化での開発を実現するに至った。

3 開発課題

3-1. 構造・レイアウト

冒頭に触れた通り、本製品は「PW-X3」の上位互換という位置付けであるため、「PW-X3」をベースとする開発コンセプトであった。そのため、「PW-X3」採用車両との搭載互換性を維持することが求められた。搭載互換性とは、ドライブユニットとフレームの取り付け面のみを指すのではなく、フレームで覆われる部分の外観形状まで同じにすることを指す。

Mg合金は従来のアルミ合金に対して、比重が約30%小さくなる反面、材料強度、ヤング率は約40%低下、熱伝導性も約30%低下することが知られている。また、腐食しやすい金属でもあることから、これまで以上に耐食性に気を配る必要があり、単純な材料置換だけではこれまでの性能、品質を維持することができない。よって、これらの背反をいかに解決していくかが開発のポイントであった。

技術課題は概ね、①強度・剛性②放熱性③耐食性の3つに分類される。

【強度・剛性】

ヤング率が約40%低下するため、剛性を同一にするために

は1.6倍の断面係数になるように設計する必要がある。

断面係数を1.6倍にするためには、板厚を1.3倍にするか形状を1.2倍拡大する方法があるが、どちらも軽量化という開発目標に反する内容である。

そのため、機能的に必要な形状、空間を見直しつつ、構造解析を用いながら最適設計を行った。これにより重量増加を抑えつつ、従来同等の品質を達成することができた(図3)。

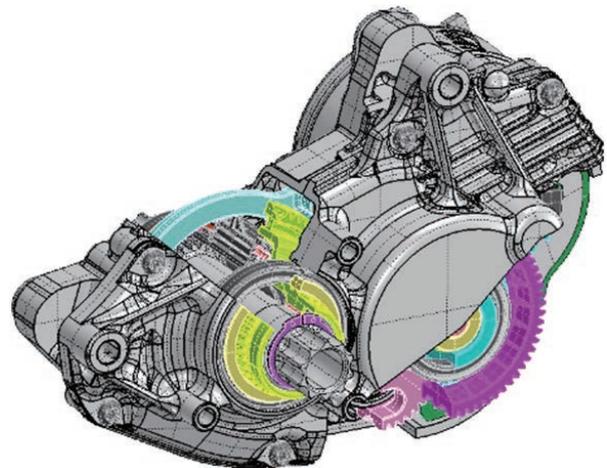


図3 ドライブユニット内部のカット断面

【放熱性】

連続走行可能時間を決定づける性能、指標で乗り物として重要な要素である。

開発当初は発熱による製品保護機能が早期に働き、開発目標を達成しない結果となった。そのため、モーターやコントローラ基板上の素子からの発熱を効率よく逃がすため、モーターを覆う筐体の表面積の拡大および放熱フィンを追加した。

【耐食性】

水分などの電解質を介した状態で異種金属との電位差により発生する“電食”を抑えるための構造を新たに検討した。後述する塗装工程の作り込みと新開発のシール構造を併用することで、Mg合金と水分が物理的に接触しない構造を採用し、品質の安定化に成功した。

3-2. 鋳造

MgDCではアルミニウム合金ダイカスト（以降、AIDC）に比べて、その合金の性質から湯じわ、湯境といった不良が発生しやすく、それらを起点とした割れ不良が発生する。また、従来モデルの材料であるADC12に比べて熱間割れに対する感受性が強く、割れやひけが発生しやすい合金でもある。本製品においてもこれらの現象に対する対策が重要となった^[2]。

MgDCにおける割れは前述の特性から次のような場所で発

生しやすい。

1. 板厚変動量の大きい場所
2. 凝固時に応力が集中する場所
3. 充填に不利な湯じわ、湯境の発生しやすい場所

追加されたフィン形状などは上記1.～3.すべてに該当する要素である。

【1に該当する部位】

急激な板厚変動により隣接する部位で凝固時間の差が生じる。その際、境目において材料強度を超える応力が発生し、割れが発生する。この現象については通常板厚を緩やかに徐変することで回避する。本部品でもリブの合流部などに採用することで割れ防止を図った。

【2に該当する部位】

凝固時の条件、形状的要因など複数の要素により発生するため、事前検証が難しい。本製品においては試作品の出来映えを蛍光浸透探傷検査により評価し、発生部位に対して過去のモーターサイクル部品の事例を参考にリブを設置した^[3]。

【3に該当する部位】

湯じわ、湯境が発生する部位に、高い応力が生じる場合、割れへと進展する可能性がある。これらは何れも解析によって予測が可能である。解析の事前準備として、当社の AIDC において作り込まれた技術理論値を基に、関連する特性値を MgDC へ置き換え、MgDC に対応した P-Q2線図を作成し鑄造条件の選定を行った。MgDC で必要な理論充填時間を満たすよう方案設計、条件設定を行い、流動解析により検証することで弱点部位の洗い出し、対策を行った。鑄造条件および方案での対策が困難な部位に関しては、応力解析の結果を参照し、流動危険部位かつ高応力部位に対して2同様にリブを設置することで補強を行った(図4)。

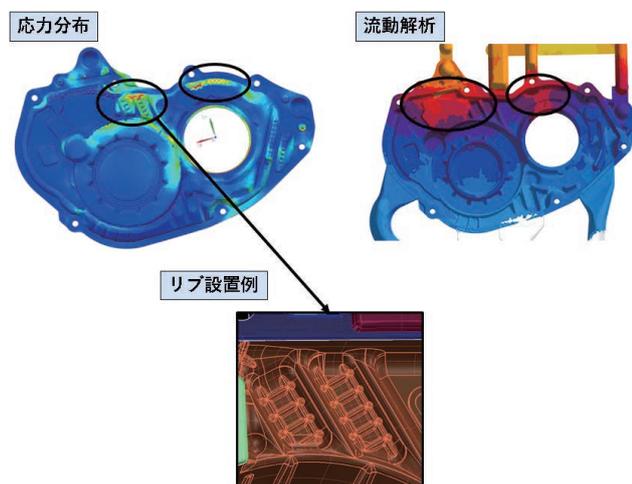


図4 製造および設計上の弱点部位検証

3-3. 加工

マイクロメートル単位の寸法・幾何精度を付与する精密機械加工工程ののちに化成被膜処理や塗装などの工程を通過すると、様々な要因により寸法・幾何形状が変化することが一般的に知られている。

Mg合金を採用した「PW-XM」は製品内部へ化成被膜処理を施すことで素地の露出を避け、耐食性を確保する必要があるので、寸法精度確保に対してリスクがあった。

そのため、数ある工程・要因ごとの寸法精度への影響を評価しつつ製品開発を進めた。

化成被膜処理の前処理に当たるエッチング工程にて顕著な寸法変化が見られたため、同工程の処理条件の管理幅を狭めることで寸法変化を抑えるとともに、これらの影響を考慮した中間管理公差を機械加工工程に設定することで要求品質を満たす管理規格を設けた。これにより、モーターサイクルのクランクケースなどと同等もしくは部位によってはそれよりも高い精度を実現する機械加工工程の構築が必要となった(図5)。

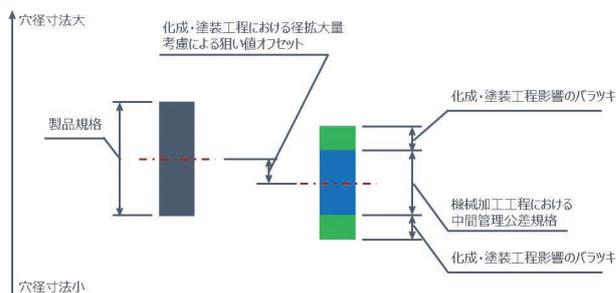


図5 後工程影響を考慮した中間管理公差設定イメージ

全般として物質は温度が高くなれば膨張し、低くなれば収縮するが、精密加工においてこの熱による膨張・収縮が製品の精度に影響する。

加えて Mg合金は Al合金に比べて温度が1℃変化したときの膨張・収縮量が大きくなるため機械加工工程における周囲環境・工作機械・ワークピースの温度を管理する必要があった。

他 Mg合金製の部品を生産してきた機械加工ラインでは精度確保が困難と判断したため、「PW-XM」向けに専用機械加工ラインを設置した。

この製造ラインには切削液を一定温度に保つ装置、熱変位を補正する工作機械などのハードウェアの導入に加えて従来よりも高頻度のワークピース測定とフィードバックなどの管理・運用方法の変更により、要求される寸法・幾何精度を実現するに至った。

3-4. 塗装

表面処理の開発では、凹凸の差が大きく間隔も狭い複雑形状を持つドライブユニットの

1. 外観の出来映えと耐食性を確保すること
2. 異種金属接触腐食への対応

を「化成処理＋静電塗装」で達成することを目指した。

【1. 外観品質と耐食性】

幾つかの条件設定で作製した試作品で品質保証部門とのレベル合わせを実施し目標レベルを設定した。意匠上からスケ・タレ・ワキが懸念される部分、機能上から塗装不可範囲の設定も有りという制約の中で幾度となく塗装条件、マスキング方法を変えながら都度、外観上の品質と塗装膜厚の出来映えを確認し作り込んでいった。塗装面の耐食性については、現行量産中の素材を使用した事前評価では、目標値に届かなかったが、下塗りを改良することで目標を達成することができた(図6)。

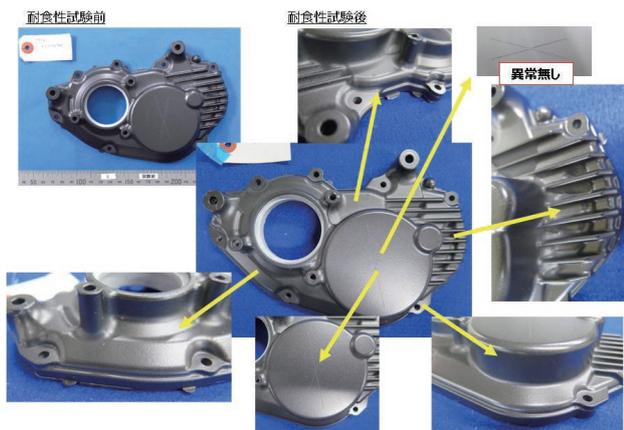


図6 耐食性試験結果

【2. 異種金属接触腐食への対応】

異種金属接触による腐食は、ボルト締結部とベアリングを覆っているシール嵌合孔に発生した。

水が溜まりづらい形状への変更と相手側のボルト、シール構造の見直しを開発側で進めた。並行して塗装側では、条件を数水準設定した試作トライと耐食性評価、塗膜厚さの測定を繰り返し行った。その結果、ある膜厚以上の下塗り層を確保することができれば、腐食を抑制できることがわかったため、最低膜厚値を決定した。

安定的に膜厚が確保できる下塗り塗装の手順を見直したことで懸念部の耐食性をクリアすることができた(図7)。

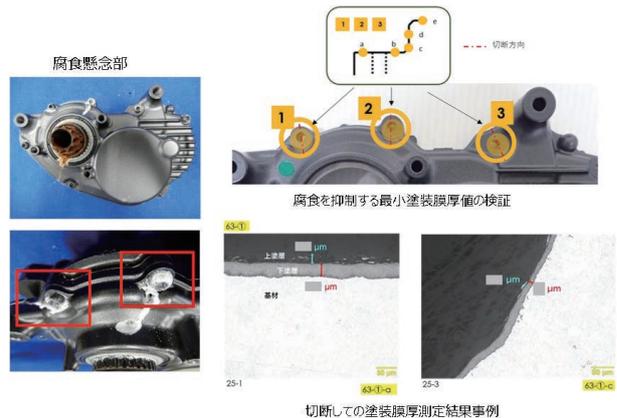


図7 腐食懸念箇所の膜厚分析

今回、表面処理工程を新たな協働相手と進めたことで、生産部門が主体となり品質保証体制を構築し、量産供給も万全な体制で開始することができた。

4 おわりに

「PW-XM」は当社最軽量のドライブユニットに仕上げることができた。ベースモデルがあったとはいえ、電動アシスト自転車特有の短期間での開発を達成できたことは、開発部門だけでなく、調達、製造、材料技術などのヤマハ発動機グループ内の様々な関係部門が一丸となって取り組んできた結果である。

今後も、電動アシスト自転車としてのさらなる提供価値の創造と市場競争力のある魅力ある商品開発を目指すとともに、脱炭素社会の実現に向け、カーボンニュートラルなライフスタイルを社会に提案していきたい。

■参考文献

- [1] Get Ready for the Cycling Boom - Experts Predict 30 million Bicycle Sales by 2030 | ECF
- [2] 小河原 和夫:超薄肉マグネシウム合金ダイカスト—その生産技術と不良対策 カロス出版
- [3] 塚本 健二, 小倉 純一, 稲村 隆義, 下位 誠:マグネシウム真空ダイカスト鑄造ホイールの開発(2017)

■ 著者



宇佐美 智文
Tomohiro Usami
ランドモビリティ事業本部
SPV 事業部
第1開発部



松原 圭祐
Keisuke Matsubara
生産本部
製造技術統括部
PT アルミ技術部



水落 新
Shin Mizuochi
生産本部
製造技術統括部
PT アルミ技術部



小原 裕司
Yuji Kohara
生産技術本部
材料技術部