二輪車用アルミニウムフレームにおける多様な機能の創出

橋内 透*・山縣 裕*・小池 俊勝*

Journal of Japan Institute of Light Metals, Vol. 56, No. 4 (2006), pp. 233-239

Creation of various functions for motorcycle aluminum frames

Toru KITSUNAI*, Hiroshi YAMAGATA* and Toshikatsu KOIKE*

Keywords: aluminum, motorcycle, frame, diecasting, welding

1. ま え が き

アルミニウム合金は軽量・高強度・形状デザインの自由度などに優れた特性を持っているため、人車一体で楽しむ二輪車においては、1980年代よりアルミニウム製フレームが採用されてきた(表1)。しかし、コストのハードルなどもあり、その採用は一部のモデルに限られていた。我々は、フレームを高速安定性とデザイン性が要求される外骨格構造と、しなやかな乗り味とジャンプに耐える強度が要求される内骨格構造に区別し、2000年以降それぞれに必要な要素技術を開発した。それにより車種ごとに異なった機能をフレームに持たせ、すべてのカテゴリーにおいてアルミニウム製とすることを可能にした。

2. 二輪車フレームの要求機能

二輪車はその使用環境により、路上で200km/hを超える高速での操縦安定性が求められるスポーツ系、および路上での最高速は150km/h程度であるがオフロードで20mを超えるジャンプをするようなON-OFF系に大きく分けられる(図1)。

スポーツ系二輪車のフレームはエンジンを抱え込む構成になっており軽量高剛性ととも外観の美しさが要求される。一方、ON-OFF系二輪車のフレームはジャンプの着地衝撃に耐えるよう高い強度と靱性が要求される。我々は、前者を外骨格、後者を内骨格と使用状況によりカテゴライズし(図2)、それらに必要な機能を満足する要素技術開発をした(図3)。

3. 高剛性外骨格アルミニウムフレーム

当社は1985年よりアルミニウムフレームの二輪車を販売してきた¹⁾が、2000年以前はコストの制約により高級車に限られていた。一例として1998年モデル(生産は1997年開始)のYZF-R1²⁾を図4に示す。メインとなるタンクレール部は2枚の板金をもなか状に溶接し、中空構造をとることにより剛性を確保している。そしてヘッドパイプやエンジン懸架部などは、複雑形状が可能な金型重力铸造(GD)によって形成している。この構成はデザイン性がよく、軽く高剛性という外骨格フレームの要求機能は満足していたが、部品点数および溶接長とも大きく、高級車以外の展開を阻んできた。

表1 ヤマハ発動機におけるアルミニウムフレーム開発の歴史

年 代	技術開発	市販車へのアルミニウムフレーム展開
1980年代	1981年：角断面アルミニウムフレーム開発 1984年：デルタボックスフレーム開発 1988年：高強度ヒドロ砂型铸造材開発	1985年：レーサーレプリカ YZR500 に初採用 1988年：レーサーレプリカ TZR250 に採用
1990年代		1994年：レーサーレプリカ YZF400 に採用 1997年：スーパースポーツ YZF-R1 に採用 1999年：スーパースポーツ YZF-R6 に採用
2000年代	2001年：金型重力铸造(GD)の大型化開発 2002年：CFダイカスト法開発 クロムフリー塗装開発 高速MIG溶接開発 2003年：7000系鍛造材の大型化開発 デジタルMIG溶接開発	2003年：スーパースポーツ YZF-R6 へ大型GD採用 2004年：スクータ YP400 へダイカストと大型GD採用 スポーツ FZ6 へダイカスト採用 On-Off YZ250 へ高強度铸造と大型GD採用 2005年：電動スクータ EC02 へダイカスト採用

* ヤマハ発動機株式会社 CRD 本部 (〒438-8501 静岡県磐田市新貝 2500 番)。R&D Operations, YAMAHA MOTOR CO., LTD. (2500 Shingai, Iwata, Shizuoka, 438-8501). E-mail: kitsunaitoru@yamaha-motor.co.jp
 受付日：平成 17 年 12 月 29 日 受理日：平成 18 年 2 月 2 日

図1 二輪車の種類

図2 二輪車用フレームの要求特性

図3 外骨格フレームに要求される機能と要素技術

これら課題に対し、CF (Controlled Filling) ダイカスト法³⁾の開発による薄肉大型で溶接可能なダイカスト部材の使用および形状自由度が大きい金型重力 casting の大型化によって、機能を向上させつつ部品点数の大幅削減を達成した。図5にその例として2003年モデル(生産は2002年開始)のYZF-R6⁴⁾を示す。メインフレームは金型重力 casting 2点の溶接構造で、それにダイカストで一体化したシートフレームがボルトで締結される。これによって、コストの削減とともに、課題であった溶接によるひずみがなくなり、寸法精度の向上を果たした⁵⁾(図6)。

次に我々は、表面性状の向上に挑戦した。メインフレームが重力金型 casting の場合、湯流れを確保するため断熱性を持つ塗型剤が必要でそれに起因する粗い表面肌となり、美しいとはいえないものであった。そこで、外観品質に優れたダイカストをメインフレームに採用した。図7にその採用例として2004年モデル(生産は2003年開始)のFZ6⁶⁾を示す。大型のダイカスト部材2点でエンジンを挟み込みボルトで締結する構成である。外観はなめらかな3次曲面を確保しつつ、内面の開放断面にはリブをたて、そしてエンジンを構造部材の一部として5点で締結することにより、フレーム剛性を上

図4 1990年代の外骨格アルミニウムフレーム

図5 外骨格フレームの例その1

	リアアーム	シートフレーム
外観
構成部材	アルミ押出し+板→CFダイカスト	
部品点数	14点→4点	25点→1点
溶接長	4.3m→2.3m	3.2m→溶接なし
製造エネルギー	82%減	84%減
製造コスト	15%減	

図6 展伸材からCFダイカストへの工法置換の例

げている。ダイカストの特長を生かした設計である。従来の鋼管溶接構造をこの構造に変更することで軽量化し、大幅な部品点数の削減でコスト低減を行った(図8)。

さらに我々は、前述した YZF-R1 の更なる進化に挑戦した。図9に2005年モデル(生産は2004年開始)の YZF-R1⁷⁾を示す。メインフレームの内側は大型の金型重力鑄造とし、そこに板金を溶接することにより中空もなか構造とし、外観肌とデザイン性を損なわずに高い剛性と軽さを達成した。また、シートフレームとリアアームは部品点数削減とデザイン性向上に YZF-R6 で実績のある CF ダイカスト製とした。

3.1 外骨格フレームに採用した要素技術

3.1.1 金型重力鑄造の大型化

金型重力鑄造は、シェル中子による中空化により剛性の確保がしやすい。また、サイクルタイムは長いものの設備費や金型費も安価なため年間数万台レベルの生産規模の二輪車に適した工法である。しかし、金型重力鑄造は大型化や薄肉化が難しかった。湯流れおよび凝固解析などのシミュレーション技術と金型各部位ごとの細かな温度制御などにより、ひずみが出やすい3次元的な大型中空形状まで成形可能になった。

図7 外骨格フレームの例その2

	2003年モデル	2004年モデル	効果
外観
部品構成	鋼管溶接	CFダイカスト	
部品数	88	4	95% 削減
重量	15.5kg	10.4kg	33% 軽量化
コスト	-	-	23% 低減

図8 鉄鋼からアルミニウムへの材料置換の例

図9 外骨格フレームの例その3

表2 ダイカスト用 A365 材料の化学成分 (mass%)

	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Zn	Sr	Al
365 新塊合金	10	0.3	0.6	0.1	0.1	0.1	150 ppm	Bal.

3.1.2 CF ダイカスト技術

本技術は、大型薄肉で溶接可能な素材を提供できる技術として、2002 年に開發生産展開したものである。ダイカスト製のフレームは CF ダイカスト技術、新塊合金の A365 材⁸⁾ (表 2) および T5 熱処理の 3 つを組合せることにより、要求される強度、伸び、寸法精度、耐食性を満足させた。

フレーム部材は大型薄肉であることが要求されるため、熱処理は T6 熱処理の溶体化によるひずみを避けた T5 熱処理を

図10 A365-T5 材の Mg 含有量と機械的性質

検討した。図10は A365-T5 材の Mg 添加量と機械的性質の関係を示す。この関係より、必要な耐力と伸び値を出すため実際の生産における Mg の添加量を調整している。その結果、

図 11 JIS ダイカスト材料と今回採用材の比較

図 12 りん酸ジルコニウム化成処理を施した新塊合金と再生合金の耐食性試験 SST72 時間後の比較

表 3 塗装前処理工程の検討

	耐食性	廃水処理	作業性	コスト	総合
クロム酸クロメート	◎	×	○	×	×
りん酸亜鉛	△	○	○	○	△
りん酸ジルコニウム	○	○	○	○	○
陽極酸化	◎	○	△	×	×
有機防錆剤塗布	○	△	×	△	×

従来の JIS 材に対し、今回の材料は高い機械的性質を示す(図 11)。大型薄肉部材の T5 熱処理は、世界的に見ても新しい試みである。

3.1.3 ノンクロム塗装前処理

スポーツ系二輪車は融雪塩の影響を大きく受ける欧州での販売が約 5 割を占める。この対応にアルミニウム部材の塗装前処理には従来防錆力に優れるクロム酸クロメートを使用してきた。今回は有害物質の排出を避けるためにノンクロムのりん酸ジルコニウム化成処理を耐食性のよい AC4CH や A365 などの新塊合金と組合せることにより防錆力を確保した(図 12)。表 3 にその前処理方法を選定した際の各処理方法の比較結果を示す。りん酸ジルコニウム化成処理は既存の設備がそのまま使えるため、新規の設備投資することなしに移行することができた。

4. 高強度内骨格アルミニウムフレーム

ON-OFF 系二輪車に代表される内骨格フレームは、そのしなりで乗り味が決まる。このフレームは操縦安定性をよくするため、空間を過度に占有しない背骨のような構造で、剛性をあえて落とし、しなやかさを出している。一方、ジャンプ着地などの際は非常に高応力となるため、従来鋼管の高強度化により軽量化と乗り味を追及してきた⁹⁾(図 13)。しかし、鋼材による軽量化も限界になってきたため、材料置換による軽量化に挑戦した。

剛性を落としフレームのしなやかさを生かした操縦安定性

20mを超えるジャンプ着地の衝撃吸収性

図 13 内骨格 ON-OFF フレームに要求される機能

図 14 ON-OFF 車アルミニウムフレームの初期構想

図 15 ON-OFF 車アルミニウムフレームの生産仕様構成

表 4 内骨格フレームをアルミニウム化した効果

	2004 年 YZ250	2005 年 YZ250	結 果
構 造	ハイテン鋼管溶接	アルミ鍛造+GD 溶接	
部品点数	106	16	85% 削減
重 量	9.1 kg	8.0kg	12% 低減

4.1 外骨格フレームに採用した要素技術

4.1.1 部材構成

図 14 は構造設計初期の構想図である。高強度の 7000 系鍛造材と押出材のみの構成では、鋼管構造に対し軽量化もわずかであった。そこで、負荷応力は低い複雑な 3 次元形状が要求されるヘッドパイプからその後方にかけては中空金型鑄造材とした。また、着地時の高応力となるその上下部分は 7N01 合金の鍛造部材でサンドイッチ状に覆うことにした(図 15)。2005 年モデルの YZ250¹⁰⁾ は 2004 年モデルの鋼管構造に対し 12% の軽量化を達成し(表 4)、ジャンプの際の高い負

荷応力を鍛造部材に均一に分散させる構成とすることができた。

4.1.2 高強度 MIG 溶接

この部材構成において、AC4CH 金型重力铸造材と 7N01 鍛造材の継手強度の確保が課題となった。我々は当初ビード自体の強度を確保するため溶加材に 5183 合金を選定し、応力を低下させる意図でビード断面積を大きくする MIG 溶接をした。しかし、継手部の 3 点曲げの強度が大きくばらつき、必要な強度を満たせなかった。その後、溶加材や溶接方法、溶接条件などを変更するトライを重ね、最終的にはデジタル制御のパルス MIG 溶接により入熱を減らし AC4CH 合金側の溶け込み深さを浅くすることにより、安定した高い強度を確保した (図 16)。

図 17 はその溶接ビード断面を、表 5 に素材および溶加材の化学成分を示す。溶け込みが大きい場合、ビード中の Si 含有量が多くなり溶加材の Mg と化合して過剰な Mg_2Si 化合物を生成する。その結果、ビードが脆化し強度ばらつきが大きくなる。一方溶け込みを小さくした場合、ビード中には Si 含有量が少なく、これにより靱性のある高い強度の継手になることがわかった。

図 16 AC4CH-T6 材と 7N01FD-T6 材の重ね継手部曲げ強度

これら溶接継手の開発により、実機による静荷重テストにおいて目標強度を満足するとともに、部材および溶接部は塑性変形のみでクラックが発生しないことが確認できた。

5. ま と め

铸造, ダイカスト, 鍛造, 溶接, 表面処理などアルミニウムに関する要素技術開発を行い, スポーツ車, 大型スクータ, 電動スクータ, ON-OFF 車など, 用途ごとに多様性を持たせ, 全カテゴリーでフレームをアルミニウム化することを可能にした (図 18)。

二輪車にとって, 軽量化とデザイン性の向上は今後ますます重要になってくると考える。リサイクルおよびリユースに優れた軽合金を素材メーカー各社の協力のもと, 設計・材料・製法の三位一体で開発し, 商品価値向上とともに, ユーザーに感動を与え続けていきたい。

図 17 溶け込み深さの違いによるビード中の化学成分比較

表 5 素材および溶加材の化学成分 (%)

	鍛造材 7N01	GD 材 AC4CH	溶加材 5183
Mg	1.3	0.3	4.5
Si	0	7.1	0.1
Zn	4.2	0.1	0.1

	2002	2003	2004	2005	2006～
要素技術	大型重力铸造	CFダイカスト クロムフリー塗装 高速MIG溶接	7000系大型鍛造 パルスMIG		
外骨格					
スーパースポーツ		YZFR6 9万台	YZFR1 5万台		
スポーツ他			FZ6 7万台	MT01 1万台	電動スクータ 0.3万台
内骨格					
スクータ		YP400 2万台			
ON-OFF			YZ250 4万台	YZ450F 2万台	

図 18 アルミニウムフレームの展開状況

参 考 文 献

- 1) 山縣 裕：塑性と加工, **40** (1999), 920-924.
- 2) 三輪邦彦：Yamaha Motor Technical Review, **25** (1998), 27-31.
- 3) T. Kitsunai and H. Yamagata: 日本ダイカスト会議論文集, (2004), 271-275.
- 4) 瀧本 宏, 狩野康伸, 天野浩一, 高橋信治, 泉 透：Yamaha Motor Technical Review, **35** (2003), 95-100.
- 5) 橋内 透, 山縣 裕, 小池俊勝：自動車技術, **57** (2003), 46-50.
- 6) 久保 裕, 原田啓一, 小林恭之, 加茂 厚, 城本 誠, 野沢久幸：Yamaha Motor Technical Review, **37** (2004), 51-57.
- 7) 小池美和, 安平明彦, 西田豊士, 藤原英樹：Yamaha Motor Technical Review, **38** (2004), 31-36.
- 8) H. Koch, et al.: TMS Annual Meeting, February (1995).
- 9) 林 康男, 杉浦義明, 櫻井太輔, 桂 健久：Yamaha Motor Technical Review, **35** (2003), 64-67.
- 10) ヤマハ発動機ホームページ： <http://www.yamaha-motor.co.jp/> (2004).