



第51回 軽金属学会 小山田記念賞 受賞講演

“World 1”の二輪車軽量化技術開発*

鈴木 貴晴**, 久保田 剛**, 橋内 透***, 浅野 峰生****, 高橋 一浩*****

Development of Motorcycle Weight Reduction Technologies as World No.1*

Takaharu Suzuki**, Tsuyoshi Kubota**, Toru Kitsunai***,
Mineo Asano**** and Kazuhiro Takahashi*****

1. はじめに

二輪車は先進国では趣味の乗り物、新興国では人々の移動手段として広く世界に浸透している。移動手段としての二輪車の特徴は機動性であり、俊敏な加速性や軽快な旋回性といった運動性能を向上するために部品の小型化、軽量化が古くから取り組まれてきた。特に軽量化は、操縦安定性だけでなく燃費改善にも効果があるため、エンジン部品や車体部品にアルミニウムを採用し軽量化を進めてきた。

二輪車の商品ラインナップは、排気量1,000 cc前後の大型モデルから100 cc前後の小型モデルに至るまで多岐にわたり、軽量車体と高性能エンジンの組合せにより各カテゴリーの要求特性に合わせた製品を展開している。Fig. 1に新興国をはじめ世界中で需要の多い排気量125 ccのコミューターと先進国の趣味性の高い排気量1,000 ccスーパースポーツに使われる材料の重量構成比を示す¹⁾。コミューターはリーズナブルな価格で提供できるようフレーム、ハンドルなどの主要部品には鉄鋼が使われ、アルミニウムはエンジンのクランクケースなどにダイカスト材が使われるのみである。一方スーパースポーツは、メインフレーム、ホイールといった大型の構造部品に多くのアルミニウムが使われるとともに、チタンをマフラーに、マグネシウムをシートフレームに採用するなどその他の金属も活

用し軽量化を追及してきている¹⁾。

今回開発した技術はスーパースポーツ向けの材料置換による軽量化技術であり「アルミニウム製燃料タンク」、「マグネシウム製ダイカストホイール」、「FSチタンコンロッド」の3つから構成されている。いずれも従来の量産車で使用していた材料よりも比重の小さな非鉄金属材料を採用しており、これまでは量産車では困難とされていた技術であるが、開発にあたっては、構造の変更のほか、それらの材料に適した生産技術を同時に開発することで量産化を実現している。それぞれの技術の概要をFig. 2に示す。

これらの技術は、世界最高峰の二輪レースであるMoto-GPマシンが培ってきたレーシングテクノロジーを受け継いだ市販車「YZF-R1」に採用され、最大出力

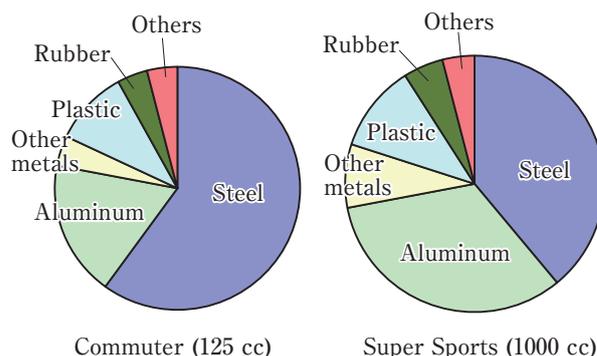


Fig. 1 Weight component ratio of materials for motorcycles.

* 本稿は軽金属, 67 (2017), 50-56に掲載。

This paper has been published in Journal of The Japan Institute of Light Metals, 67 (2017), 50-56.

** ヤマハ発動機(株) エンジンユニット コンポーネント統括部 材料技術部
Materials Division, Engine Unit, Yamaha Motor Co., Ltd.

*** ヤマハモーターエレクトロニクス(株) 品質統括部
Quality Section, Yamaha Motor Electronics Co., Ltd.

**** (株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部
Research Department VI, Research & Development Division, UACJ Corporation

***** 新日鐵住金(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所
Steel Research Laboratories, Research & Development, Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

	Aluminum fuel tank	Magnesium die cast wheel	Fracture-split titanium connecting rod
Product			
Replacement	Steel to aluminum	Aluminum to magnesium	Steel to titanium
Feature	Lightest in the world (over 17 L)	World's first (for large motorcycle)	World's first

Fig. 2 Three technologies developed for motorcycle weight reduction.

200馬力(従来比18馬力向上), 車両重量199 kg(従来比10 kg軽量化)を実現し, 2015年から販売されている。これらの技術を搭載することでパワーウエイトレシオを1より小さくすることが可能となり, 商品力向上に大きく貢献している。本稿ではこれらの技術の開発課題や取り組み項目を紹介する。

2. アルミニウム製燃料タンクの開発

二輪車向けのアルミニウム製燃料タンクは, かねてからレースには使われてきたが, 成形が難しい部位は分割して製造していたため工程が複雑で大量生産が難しく, 当社でも一部の限定車への採用にとどまっていた。今回, 燃料タンクをアルミニウム化するにあたり, 高いデザイン性と生産性を両立させる目的で構成の見直しを行い, アウターパネルは左右のパネル同士の溶接を廃止し, 1ピースに変更して接合もシーム溶接からアーク溶接に変更している。Fig. 3に開発品と従来品の違いを示す。開発にあたっては, ドレンパイプやブラケット類といった構成部品もすべてアルミニウム化することで重量3.8 kgの従来品に比べて1.7 kgの軽量化を実現し, 従来品同等の機能を有する軽量化オールアルミ製燃料タンクを実現している。

	Conventional product	Developed product
Material	Deep drawing steel sheet	5000 series aluminum alloy sheet : GC150
Component	Outer : 2 piece (left and right) Inner : 1 piece	Outer : 1 piece Inner : 2 pieces (upper and lower)
Bonding	Seam welding	CMT welding
Figure		

Fig. 3 Comparison between the conventional and the developed products for fuel tank.

2.1 材料

アルミニウム板は, 鋼板と比べて伸びやr値が小さく成形時に破断しやすいため鋼板と同じデザインのパネルを成形することが難しい。そのため加工度が低くなるようにデザイン変更するか分割して接合する事例が多かった。二輪車の燃料タンクは, ライダーが体を支えるためのニーグリップ部を深くしぼった形状が要求される。そのため成形限界が高く, 機械的性質が鋼板に近い特性を有する材料の選択が求められ, インナーパネル, アウターパネルには(株)UACJが開発した高い成形性を有する5000系アルミニウム板材「GC150」を採用した²⁾。アルミニウム板と鋼板の機械的性質と成形性の比較をTable 1に示す。GC150-Oの伸びやr値は, 輸送機器用のアルミニウムパネル材として一般的な6016-T4や5182-Oよりも高い値を示す。また給油口, 燃料ポンプ座面には6000系冷間鍛造品を採用し, 高い強度を確保するとともに一体成形による優れた寸法精度を確保している。

2.2 プレス成形

プレス方案の検討にあたり, 成形中の割れ, しわの発生を防ぐため, GC150-Oの材料特性を反映した高精度な成形シミュレーションを構築し, 細部にわたって形状の最適化を行っている。潤滑剤は, 台上試験により絞込みを行い, 製品を模したテスト用金型を使って選定した。Fig. 4に成形時の摩擦係数が異なる2種類の潤滑剤を準備し, 成形可能なしわ押さえ力を調べた結果を示す。潤滑剤Aは1,000 kNまで割れが発生せず800 kN以下ではしわが発生した。一方, 潤滑剤Bは1,000 kNでは割れが発生し, 700 kN以下ではしわが発生した。これにより割れやしわの発生領域は潤滑剤により変化することが明らかになった。成形品の外観を比較すると潤滑剤Bには成形品に絞り傷が多く認められた。製品の絞り傷は金型のダイRにアルミニウムが部分的に凝着することで発生しており, 凝着の進行は摩擦係数の上昇につながる。そのため, 絞り傷が発生しにくい潤滑剤Aを選定した。

Table 1 Mechanical properties and drawabilities of the aluminum alloy sheets and the mild steel sheet.

Alloys	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	n value	r value	Limit drawing ratio*
6016-T4	230	120	27	0.27	0.60	1.9
5182-O	270	120	28	0.31	0.60	2.0
GC150-O	285	130	34	0.33	0.75	2.1
SPCC	310	170	45	0.24	2.00	2.2

* Punch diameter : φ50 mm, Die diameter : φ53 mm, Punch speed : 120 mm/min

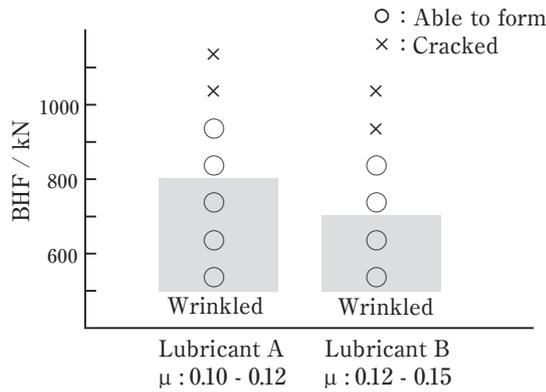


Fig. 4 Effect of the lubricants on cracking and wrinkling.

2.3 接合

アルミニウムは電気抵抗の小さな金属のため大きな溶接電流が必要なシーム溶接からアーク溶接に変更し、それにあわせて継手構造も変更した。燃料タンクの部品機能のひとつに気密性の確保があり、溶接部の信頼性向上のためCMT溶接機を導入してロボットによる自動溶接を行っている。CMT溶接³⁾は、欧州で開発されたアーク溶接技術で溶接ワイヤーの送給を高速で正負に制御することで安定した溶滴の短絡移行を可能にする技術である。この技術の活用によりスパッタのない後仕上げ不要な接合を実現した。さらに溶接トーチを左右に振るウイーピングと組み合わせることでFig. 5に示すように板厚を上回る板間隙間量になった場合でも施工可能とし、かつ周期性のある美しいビード外観も実現した。これらの結果、溶接条件範囲を広く設定することが可能になり溶接工程の生産性を大きく向上することができた。

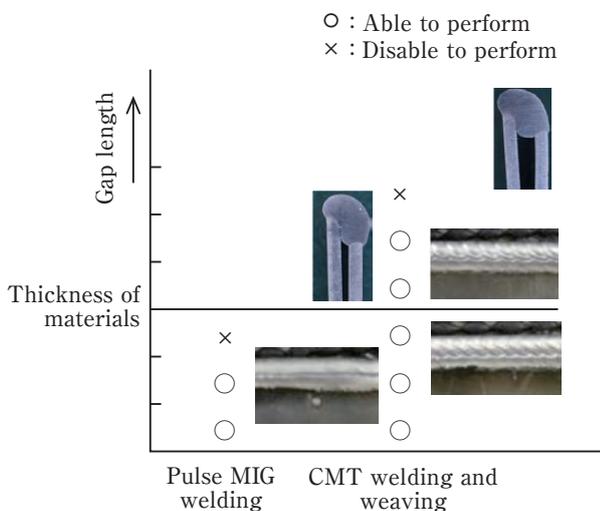


Fig. 5 Range of the gap length where welding can be performed.

2.4 表面処理

燃料タンクは二輪車の部品の中でも外観要求レベルが高い部品であり、耐食性の確保と高い外観品質の確保が求められる。アルミニウム製燃料タンクの表面処理は、ノンクロム系化成処理と塗装を組み合わせている。さらに高級モデルの「YZF-RIM」では職人が一つ一つ手仕上げでバフ掛けを施し、その上にクリア塗装をしてアルミニウムの持つ素材感を更に引き立てており、成形や接合分野の先端技術と匠の技術の融合を図っている。

3. マグネシウム製ダイカストホイールの開発

ホイールは、モーターサイクルの操縦安定性と外観に影響を与える部品であり、当社ではバネ下重量の低減と意匠性の向上を狙ってホイールの軽量化に取り組んできた。二輪車のホイールはアルミニウム重力鋳造材をT6熱処理し、機械加工後に表面処理する工法が一般的である。一方、当社では熱処理が可能なCF (Controlled Filling) ダイカスト技術を開発し、構造部材へのダイカスト鋳物の採用に取り組み、軽量化と生産性の両立を図ってきた⁴⁾。今回の開発にあたっては、その技術を生かしてさらに比強度の高いマグネシウムに材料置換した。これにより前後で870 gの軽量化を達成するとともにフロント4%、リア11%の慣性モーメントの低減を実現しており、走行性能向上に貢献している。さらにマグネシウム部品の製造における懸案項目である火災や粉塵爆発のリスクに対しては、ダイカスト鋳造から仕上げ、機械加工、表面処理までを社内一貫工程を敷いて対応し、定期的な安全教育を実施して作業安全性の確保と安定供給および品質の安定化を図っている。開発品と従来品の違いをFig. 6に示す。

	Conventional product	Developed product
Material	AC4CH-T6	AM60B-F
Component	Five inflated spokes formed by gravity die-casting	Ten H-shaped spokes formed by die-casting
Surface treatment	Chemical conversion and 2-layer coating	Chemical conversion and 3-layer coating
Figure		

Fig. 6 Comparison between the conventional and the developed products for wheel.

3.1 材料

マグネシウム合金は比熱が小さく、凝固し易いため今回のような流動長が1 mを超える大型铸件を铸造するためには高速で短時間のうちに充填する必要がある。そこで材料には凝固温度範囲が広く湯周り性が良好で延性に優れるマグネシウム合金AM60Bを採用している。短時間充填を行う場合、溶湯の流速が上がり、流動制御が難しく空気を巻き込み易くなるため、今回真空ダイカスト法を選択している。Fig. 7にAM60B真空ダイカスト材の真空度の違いによる機械的性質を示す⁵⁾。真空度が-0.06 MPa (ゲージ圧) ではオーバーフロー側の引張強さはゲート側とほぼ同等になり、製品全体で安定した強度が確保される。

次に、疲労強度を比重で除した値を比疲労強度と定義して今回のマグネシウムダイカスト材AM60Bと車体用のアルミニウムダイカスト材A356-T5との比較をFig. 8に示す。マグネシウムダイカスト材の比疲労強度はアルミニウムダイカスト材よりも約20%高く、疲労強度が要求される部位の軽量化に貢献している。

3.2 真空ダイカスト技術

リム幅6インチ以上リム径17インチという世界で前例のないサイズのホイールをダイカスト铸造するにあたり、ホイールセンター側をゲートとし、外周側のリムへ均一な湯流れを実現するために、リム4方向スライドを備えた3枚型構造の真空ダイカスト技術を開発した。マグネシウム铸造において重要な部分を占める製品設計では、軽量化だけでなく流動性や凝固を損な

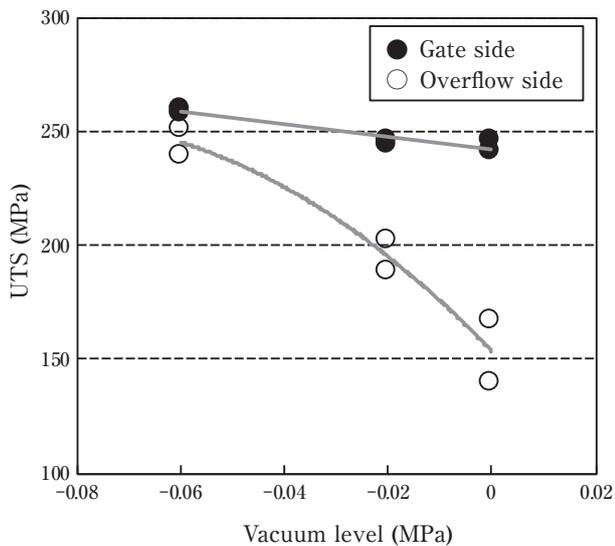


Fig. 7 Change in the mechanical property of AM60B casted by the vacuum die-casting method at different vacuum levels.

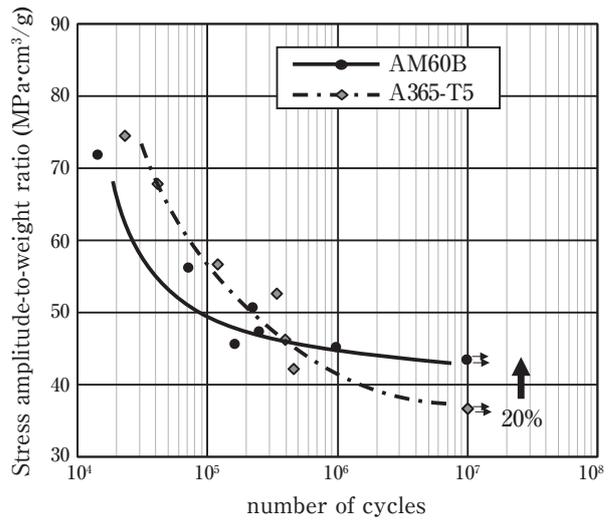


Fig. 8 Difference in stress amplitude-to-weight ratio between AM60B and A356-T5.

わないよう板厚バランスを考慮した製品形状の作りこみを繰り返している。铸造では、凝固温度範囲の広い合金において発生しやすい凝固割れを防ぐため、収縮応力を分散させることを目的に長いスパンの平面にはFig. 9に示す収縮防止リブを追加している。隅Rにはシボにより突起形状を付与し、局所的に表面積を増やすことで凝固時間を早めている。ゲートから遠いリムに関しては、流動性の向上のためディンプル形状を付与し、湯じわの低減を狙っている。金型設計では、各々の入子の合面に耐熱シールを最適な位置に配置し、複数の真空システムを用いて真空度を確保している。金型の可動部分を小さく設計して真空引き体積を最小化することで真空引き時間の短縮も行っている。金型の構造をFig. 10に示す。

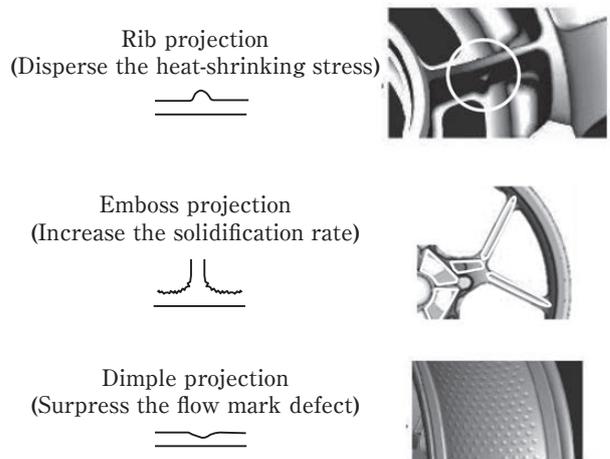


Fig. 9 Unique characters of the surface shape in the newly developed wheel.

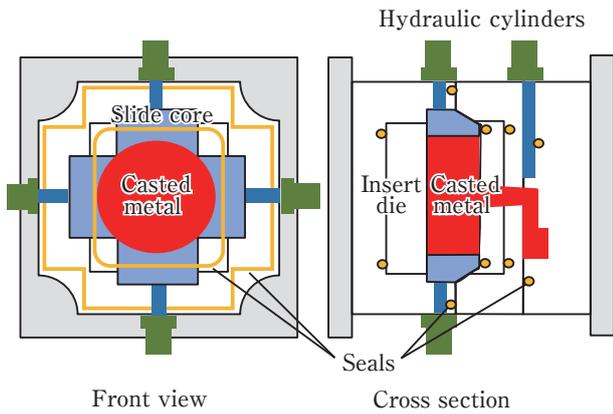


Fig. 10 Structure of the three blades type die cast mold for the high vacuum die-casting method.

3.3 表面処理

防食に関しては、インゴットの成分管理と溶解炉の温度管理を行うことで溶湯中の不純物量を低減し、素材耐食性を悪化させないよう留意した上で、高耐食下地処理と電着塗装を組み合わせた3層塗装により高い耐食性を確保している。異種材料との接触部はFig. 11に示すようにマグネシウムと電位差の小さな金属を選択し、化成処理皮膜や塗膜のほか相手材へのアルマイト皮膜を介して異種金属を直接接触させない構造⁶⁾とし、さらに樹脂やガスケットを用いて水の入りにくい構造にすることで電食防止の対策を施している。

4. FSチタンコンロッドの開発

コンロッドの軽量化はエンジンの往復重量および回転重量を低減できるため、出力向上や省燃費化に有効である。チタン合金は比強度が高く、コンロッドの軽量化には有望な材料であるが、同時に材料コストも高く、摺動部の磨耗対策も必要ことからレース用モデルなど採用は限られていた⁷⁾。

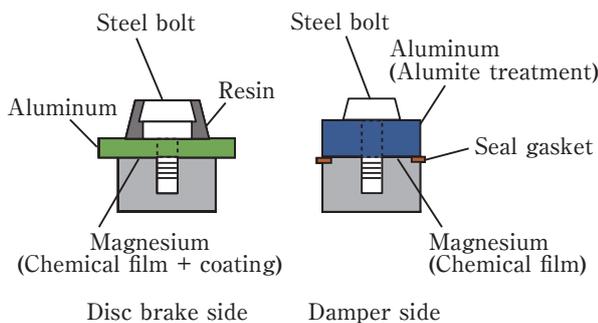


Fig. 11 Fastening structures with the electrolytic corrosion prevention function.

今回の開発にあたり、チタン合金としては世界初となる大端の破断分割 (FS) 工法を採用し、従来の鋼製 (1.35 kg/4本) と比較して0.27 kgの軽量化を図り、直列4気筒の排気量1,000 ccエンジンの量産コンロッドとして世界最軽量を達成している。コンロッドの軽量化によりエンジン回転数を1,000 rpm向上させることができ、それによって最高出力の向上を可能にした。

チタン合金の機械加工は難加工であり、加工品の精度向上と加工工程の集約を目指して大端破断割り工法 (FS工法) を採用している。これにより大端内径の寸法精度を向上させた上で加工の工程数は従来の約2/3に減らすことができ、さらに大量生産を阻んでいた研磨工程の廃止を実現している。また、チタン合金製コンロッドの課題である耐摩耗性と耐凝着性については、従来の銅ブッシュの圧入や溶射に対し、本モデルでは窒化クロム (CrN) ドライコーティングを選定し、軽量化、信頼性とコストを両立している。開発品と従来品の違いをFig. 12に示す。

4.1 材料

コンロッドは、エンジン運転中に繰り返し応力かかる部品であるため高い疲労強度が求められる。コンロッド用のチタン合金にはTi-6Al-4Vが採用される事例が多い^{8)~11)}が、高価な合金成分を用いた合金であるため、量産機種への展開は難しい。そこで比較的安価な合金成分を用いてTi-6Al-4Vに匹敵する機械的性質を有する合金の選定を行い、新日鉄住金(株)が開発した $\alpha + \beta$ 型チタン合金である「Super-TIX51AF」合金 (以下Ti-5Al-1Fe)¹²⁾を採用した。この合金の疲労強度を回転曲げ疲労試験機を用いてTi-6Al-4V、従来品のSCM420浸炭処理と比較した。Fig. 13にそれぞれの応力振幅を比重で除した値を比疲労強度と定義して示す。Ti-5Al-1FeとTi-6Al-4Vは同等の疲労強度を有しており、Ti-5Al-1Feの比疲労強度はSCM420浸炭処理よりも44%高い。Ti-5Al-1Fe

	Conventional product	Developed product
Material	SCM420 (Carburizing treatment)	$\alpha + \beta$ type Ti alloy (Ti-5Al-1Fe)
Method	Fracture split	Fracture split
Surface treatment	None	CrN dry coating
Figure		

Fig. 12 Comparison between the conventional connecting rod and the developed products.

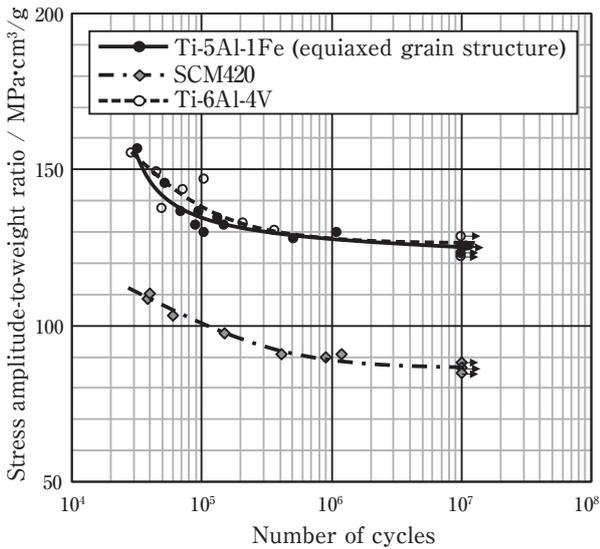


Fig. 13 Stress amplitude-to-weight ratio of Ti-5Al-1Fe (annealing at 1013K), Ti-6Al-4V (annealing at 1013K) and SCM420 (carburizing treatment).

のβ変態点は1283 Kでありβ変態点以上の温度で熱間鍛造すると針状組織になる。針状組織は疲労強度が16%低くなるため、1283 K以下で鍛造を行っている。

4.2 FS (破断分割) 工法

FS工法はロッドとキャップを一体で鍛造し、大端の内径などの機械加工を行った後に破断させ、クランク軸に組み付ける工程で再度組み付ける工法である。FS工法の特徴をFig. 14に示す。FS工法の利点は、コンロッドを組み付けるときにロッドとキャップが位置決めされることで大端内径の精度が向上し、運転時に内径側に発生する弾性ひずみであるクローズインも3 μm減少することが確認されている¹³⁾。しかし、そのためには破断面は延性破面ではなく脆性破面である必要がある¹⁴⁾。衝撃性を評価する指標にはシャルピー衝撃値が一般的である。FS工法に最適化された鍛造鋼では19 ~ 23 J/cm²¹⁵⁾であるのに対し、Ti-6Al-4Vでは39 J/cm²¹⁶⁾であり、チタン合金は脆性破断させることが難しい材料であると推測される。そのため、それぞれの材料において温度とひずみ速度を変化させて脆性破面の発生する領域を調査した。結果をFig. 15に示す。

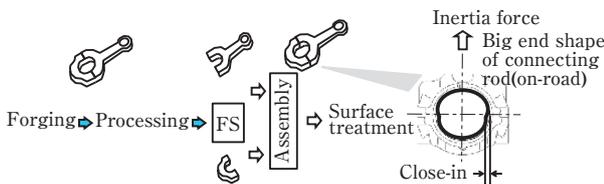


Fig. 14 Characteristic of FS (Fracture Split) method.

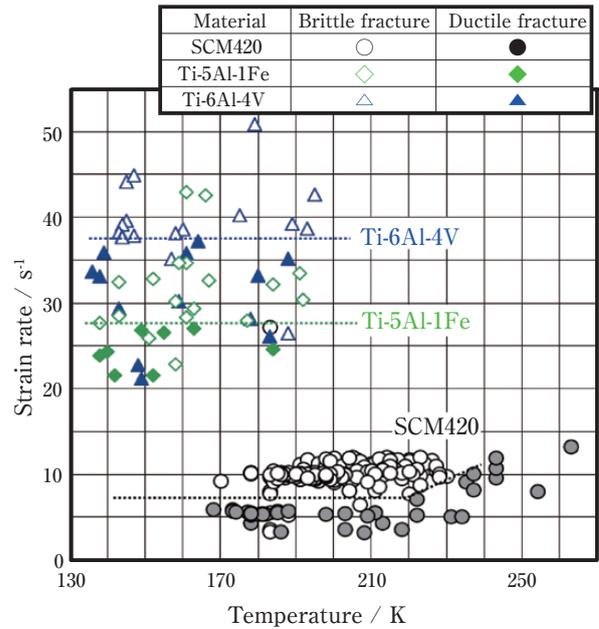


Fig. 15 Effect of temperature and strain rate on fracture morphology.

チタン合金に必要なひずみ速度は、Ti-5Al-1Feは28 s⁻¹以上、Ti-6Al-4Vでは38 s⁻¹以上であり、鋼製コンロッドよりも高いひずみ速度が必要であることが分かる。なかでもTi-5Al-1FeはTi-6Al-4Vよりも低いひずみ速度で破断させることが可能であることが明らかになった。

4.3 表面処理

FSチタンコンロッドにおける小端の耐摩耗表面処理の選定では、摩擦係数、耐摩耗性、耐焼付き性および皮膜の付きまわりの観点から検討を行った。エンジン油中における摩擦係数をFig. 16に示す。表面処理のないTi-5Al-1Feは、摩擦係数がSCM420に比較して3倍以上であるが、表面処理を行った場合、TiAlN以外は、SCM420と同等の摩擦係数を示している。以上より、Ti-5Al-1FeはTiAlN以外の表面処理をすることでSCM420同等の摺動抵抗になることが明らかになった。耐摩耗性、耐焼付き性に関しても同様に台上評価試験を活用して検討を行った。内径側への付きまわりに関しては同じCrNでもスパッタ法と比べてアーキオンプレATING (AIP) 法ではイオン化率が高いため、膜の付きまわり性が良く組織が緻密になることが知られている¹⁷⁾。処理する対象が小端の内径側であることからAIP法によるCrN皮膜を採用した。

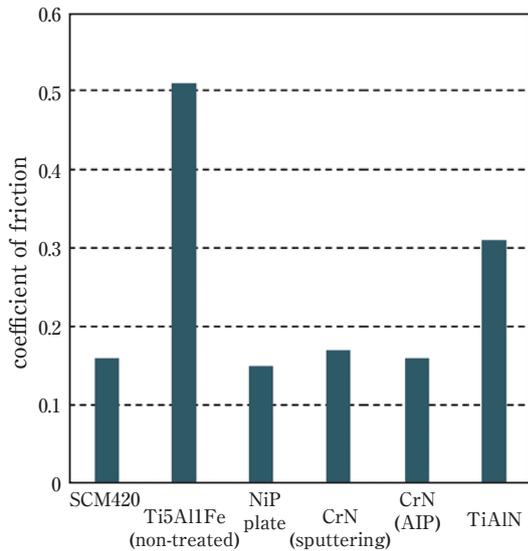


Fig. 16 Coefficient of friction in the engine oil.

5. まとめ

二輪車の軽量化のため「アルミニウム製燃料タンク」、 「マグネシウム製ダイカストホイール」、 「FSチタンコンロッド」の開発を行った。従来の量産車で使用していた材料よりも比重の小さな非鉄金属材料に材料置換することで大幅な軽量化を実現し、2015年モデル「YZF-R1」および「YZF-R1M」に採用され、二輪車の商品力向上に大きく貢献した (Fig. 17)。

これらの軽量化技術の採用により、素材メーカーが開発した高性能な軽量化材料の上市の機会となり、合計500トンを超える需要開拓の機会となった。これにより軽金属への材料置換による軽量化のさきがけとなり、今後の輸送機器の軽量化技術開発に拍車がかかるものと期待される。



Fig. 17 YZF-R1M (2015 model).

参考文献

- 1) 鈴木貴晴：軽金属溶接, **53** (2015), 77-82.
- 2) アルミワールドUACJ (株), <http://www.alumi-world.jp>
- 3) 古川一敏：溶接学会誌, **75** (2006), 615.
- 4) 橋内透・山縣 裕・小池俊勝：軽金属, **56** (2006), 233-239.
- 5) 鈴木貴晴, 稲波純一, 小池俊勝：Development of the Magnesium Die-Cast Motorcycle Chassis IMA2008 paper, (2008).
- 6) 鈴木貴晴：防錆管理, **9** (2013), 101-105.
- 7) Kubota, T., Doi, K., Murakami, T., Kojima, Y. and Miura, T., “Development of Fracture-split Connecting Rods made of Titanium Alloy for Use on Supersport Motorcycles”: SAE International Journal of Engines, **9** (2016), 483-490.
- 8) 弦間喜和 “自動車部品への軽金属材料の実用化”：軽金属, **63** (2013), 204-208.
- 9) 大隅弘, 伊藤健, 野々川賢一, 水野賀之, “YZF-R7”, Yamaha Motor Technical Review, **28** (1999), 22-25.
- 10) 松原敏彦, “快削チタン合金コネクティングロッドの開発”, チタニウム・ジルコニウム, **39** (1991), 175-184.
- 11) 萩原好敏, 高橋恭, 村上敦, 丸井勇治, “二輪車用軽量チタンコンロッド”：Honda R&D Technical Review, **2** (1990), 229-237.
- 12) 藤井秀樹, 高橋一浩, 山下義人, “自動車部品へのチタン材適用”：新日鉄技報, **378** (2003), 62-67.
- 13) Kubota, T. and Yamagata, H, Lightweight and High Strength Connecting-Rods using Titanium and Steel: FISITA (2006) M033.
- 14) Kubota, T., Iwasaki, S., Isobe, T. and Koike, T., “Development of Fracture Splitting Method for Case Hardened Connecting Rods”: SAE Technical Paper 2004-32-0064, 2004.
- 15) 井上幸一郎, 中村貞行, “かち割りコンロッド用非調質鋼の開発”：電気製鋼, **71** (2000), 81-87.
- 16) 大同特殊鋼株式会社, “大同のチタン・チタン合金”, 2004.
- 17) Vetter, J., “An Innovative Approach to New Hybrid Coatings based on HiPIMS Technology”, TIRI+SFSJ Tokyo 7. November, 2012.



鈴木 貴晴 (Takaharu Suzuki)
ヤマハ発動機(株)
エンジンユニット コンポーネント統括部
材料技術部



久保田 剛 (Tsuyoshi Kubota)
ヤマハ発動機(株)
エンジンユニット コンポーネント統括部
材料技術部



橘内 透 (Toru Kitsuna)
ヤマハモーターエレクトロニクス(株)
品質統括部



浅野 峰生 (Mineo Asano)
(株)UACJ 技術開発研究所 第六研究部



高橋 一浩 (Kazuhiro Takahashi)
新日鐵住金(株) 技術開発本部 鉄鋼研究所