

要旨

7000系アルミニウム合金の強度特性と延性を両立させ、ハンドルに必要とされる要求機能を得るために最適化した工程と生産技術を開発することで、軽量かつ操作性に優れたアルミニウム製テーパードハンドルを実現した。モーターサイクルにおけるハンドルの役割は、路面の状態を感知したり、ライダーの操舵意思を車両に伝えたりすることであり、ハンドルは操縦安定性に影響を与える部品のひとつである。製法は、鋼管を曲げるのが一般的だが、最近では、アルミニウム管を使用し、かつ断面形状を変えるハンドルを採用する機種もみられ、ハンドル軽量化のニーズは強い。本報では、軽量かつ高剛性、さらに外観の美しさで定評のあるアルミニウム製テーパードハンドルに着目し、二輪車、特にオフロードモデルやコンペティションモデルの使用環境に耐えるハンドルをさらに軽量化した事例を紹介する。このようにして開発したアルミニウム製テーパードハンドルは従来品(644g)よりも約100g軽量化し、2018年より当社を代表するコンペティションモデルであるYZ450Fに採用されている。

Abstract

By leveraging both the strength and ductility properties of 7000 series aluminum alloy to develop optimized processes and manufacturing technology which obtains the functionality demanded of handlebars, Yamaha Motor has succeeded in creating aluminum tapered handlebars which are both lightweight and have excellent controllability. The role of handlebars in motorcycles is to provide feedback on the road surface and convey the rider's control inputs to the machine. Handlebars are thus one component which influences handling stability. Handlebars are typically produced by bending steel tubes, but handlebars made of aluminum tubes and with different cross-sections have recently appeared, with the demand for lighter handlebars also significantly increasing. Focusing on aluminum tapered handlebars, which have an established reputation for light weight, high rigidity, and an attractive appearance, this report showcases examples of further weight reductions in handlebars which can withstand demanding usage situations, particularly in off-road and competition motorcycle models. The handlebars developed using the methods described in this report weigh approximately 100g less than previous handlebars (which weighed 644g), and are featured on Yamaha's iconic YZ450F competition motorcycle from the 2018 model year onwards.

1 ハンドルの部品機能

モーターサイクルのハンドルは、ハンドルパイプとグリップから成り、ハンドルパイプはフロントサスペンションにハンドルクラウンを介して結合されている。ハンドルの全長はグリップの手の届きやすさ、操作のしやすさを考慮して決定され、ハンドルの太さは、ハンドルに負荷される力やグリップの内径寸法により決定される。また、ハンドルにはアクセルやブレーキレバー、クラッチレバーやスイッチユニットといった操作系部品が集中して配置されるため、外径形状が変化しないほうが部品の組み付けが容易である。

一方、二輪車が走行する路面は平坦な路面ばかりではな



図1 YZ450Fに採用されている軽量アルミニウム製テーパードハンドル

く、荒れた路面や大きな起伏をもった路面もある。そんなときハンドルはライダーの体を支える役割も果たしており、路面から激しい振動がサスペンションに伝わったときは、振動を減衰させる特性も必要である。そして万が一の転倒時には、ハンドルがすぐに折れずに曲がる特性も求められる。したがって、ハンドルは一様に強度、剛性を高めるというよりは、適度な強度と剛性のバランスを狙って作り込んできた部品である。

ハンドルの強度や剛性のバランスをとる手段として、ストレート管を曲げて製造したハンドルの中央付近をブレースで連結したハンドルがある。ブレースによりハンドルの変形が規制されるため、ハンドルの曲げ剛性を高めることができる。しかし、部品点数が増えたり、組み立て工数が増えたりすること、ブレースが他の部品と干渉しないようにスペースを確保しなければいけないという課題もあった。もうひとつの手段として、ストレート管をあらかじめ先端に向かうにつれて外径が細くなるように加工しておき、その後曲げ加工して製造するテーパーハンドルがある。この方法によると、中央部と端部で断面二次モーメントを比較的自在に変えることができるようになり、設計の自由度が高くなる。また、ハンドル単体で強度や剛性のバランスをとることができるため、ブレースが不要になり、部品点数も減って、軽量化と省スペース化に繋げることができる(図2)。当社のコンペティションモデルにおけるそれぞれのタイプの採用実績を振り返ってみると、2005年モデルまではブレース付きアルミニウムハンドルを採用しており、その後2006年モデル以降では、アルミニウム製テーパーハンドルを採用している。そこで、我々はアルミニウム製テーパーハンドルに注目し、ハンドルの強度や剛性のバランスを確保しつつ、さらに軽量化して操縦安定性を確保する可能性を探った。



図2 採用されたアルミニウム製テーパーハンドルのテーパー部分拡大

2 断面係数を可変にする工法

ハンドルのように直径が20-30mmで長さが約800mmの金属管の断面形状を変化させるには、以下に挙げる2つの工法が代表的である。ひとつは金属管の外側を叩きながら逐次変形させて、外径を小さく肉厚を厚くしていくスウェーピングと呼ばれる工法である。スウェーピングは鋼管、アルミニウム管を問わず成型が可能であり、輸送機器部品から日用品まで広く使われている。もうひとつの工法は、スウェーピングとは逆の原理になるが、金型の中に金属管を置き、内径側から高圧の水でふくらませて、外径を大きく肉厚を薄くしていくハイドロフォームと呼ばれる工法である。ハイドロフォームは、金型にあらかじめ掘り込んだ形状に金属管を転写していくため、加工が可能であれば外径形状には制約がない。さらに場所によって丸型から角型に変化させることも可能である。そのため輸送機器の足回り部品など、それぞれの場所で最適な断面形状を要求される部品に採用されている。当社でもコンペティションモデルのリヤアームに採用している事例がある(図3)。

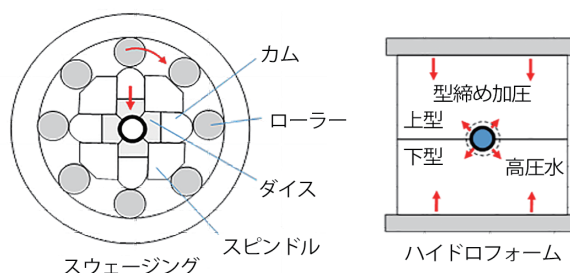


図3 断面係数を可変にする工法

モーターサイクルのハンドルにはアクセルやクラッチ、ブレーキといった操作系部品が取り付けられる。上下分割になったホルダーを2本のボルトで締め付けて固定する方法が採用されているため、部品を取り付ける部分の外径形状は丸型が好ましい。そのため工法開発にあたり、表1に示すようにそれぞれの工法が持つ特徴を比較し、外径形状、肉厚などの設計自由度と、加工速度や設備用件などの生産性を考慮して、スウェーピングを選択している。それ以外にも、アルミニウム製テーパーハンドルを製造する過程でスウェーピングが持つ利点は、分割されたダイスが回転しながら素材を叩くため、外径側の材料がより塑性加工され、機械的性質が向上する点、順次叩きながら全長を伸ばすことができるのでパイプ加工の素材歩留まりも上がり、切粉も発生しない点などがある。以上のことからスウェーピングはアルミニウム製テーパーハンドルの製造に適している工法と判断でき

る。しかし、スウェージングはハイドロフォームとは対照的に、外径側および内径側の形状自由度は低い。外径形状は丸型が好ましいが内径形状は丸型に限定されない自在な形状が求められることもある。それを解決する方法としてスウェージング加工時に心金を用いて内径にセレーション溝を付けたり、肉厚を徐変させたりする検討を行った（図4）。この方法と端面からの機械加工を組み合わせることで、内径側の形状をほぼ自在に製造することが可能になり、それぞれの場所で最適な断面形状を実現することができるようになった（図5）。

表1 スウェージングとハイドロフォームの工法の比較

分野	特長	スウェージング	ハイドロフォーム
設計自由度	加工分の肉厚	厚くなる	薄くなる
	外径形状	丸型	制約は無い
	内径形状	丸型 → 自在	略外径形状
生産性	加工速度	500mm / 分	2分 / ショット
	金型	汎用金型	線用金型
	副資材	なし	高圧水、シール

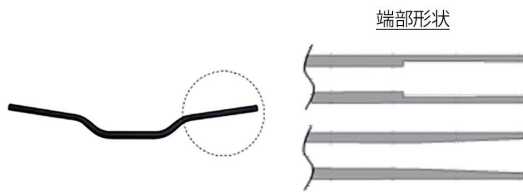


図4 スウェージングで製造可能なハンドル端部の形状例

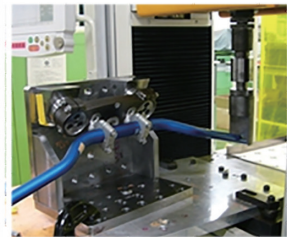
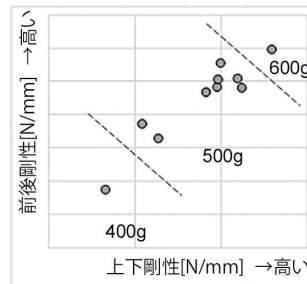


図5 心金を用いたスウェージングで試作したハンドル端部の形状

3 ハンドル断面形状の開発

ハンドルの軽量化を達成するにあたり、まず取り組んだのがハンドル外径と肉厚分布の決定である。ハンドル中央部は、ハンドルステムを介してハンドルクラウンと締結されるため、ハンドルステムに取り付け可能な寸法として外径はφ 28.6mm、またグリップ部の外径はφ 22.2mmが標準サイズとなっている。そのため、事前に実施した強度解析結果から、ハンドルとしての強度を確保できる素管肉厚を3.0-4.0mmと見積もり、曲げ部、曲げ部とグリップ部間、グリップ部の肉厚を変化させた試作品を作成し、静的曲げ剛性の評価を行った。試験速度は50mm/min、負荷方向は車両の前後方向と上下方向、ジグとハンドルの接触する部分には

潤滑油を塗って試験を行っている。試験方法と結果を図6に示す。前後方向と上下方向の剛性の関係は、上下方向の剛性のほうが前後方向よりも約25%高く、素管肉厚に依存して、ほぼ直線状にプロットすることができる。最も剛性の低いものはハンドル重量が500gを下回り、最も剛性の高いものは600gを上回っているが、ほとんどはハンドル重量が500-600gの範囲に分布している。この中から剛性対重量の比率が比較的大きなものを抽出していき、最終的にハンドル中央部肉厚は3.2mmに決定した。肉厚が薄くなることで軽量化は可能だが、断面二次モーメントは小さくなるため剛性が低下し、操縦安定性が変化することが懸念された。そこで静的曲げ時の歪の分布を調べ、（図7）歪量の大きな部分の肉厚を厚くすることで、変形量を抑えることとした。



測定方法

図6 静的曲げ剛性の評価結果とハンドル重量

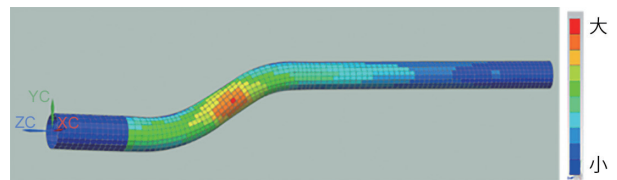


図7 静曲げ時の歪の分布

次に肉厚分布と操縦安定性の関係を調べるため、曲げ部とグリップ部間、グリップ部の肉厚を変えたハンドルを準備し、操縦安定性評価を行った。結果を図8に示す。

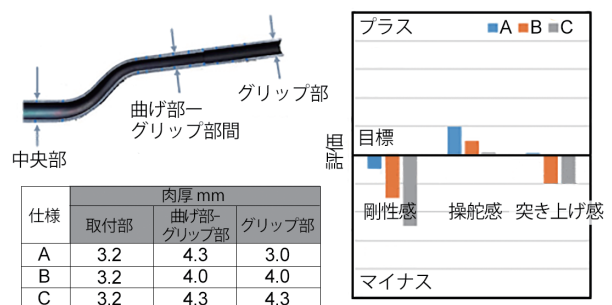


図8 ライダーによる操縦安定性評価

図8に示した評価結果の各項目は、それぞれ以下を表している。

- 剛性感 - ライダーが与えた負荷に対して適度な変位が得られているか
- 操舵感 - 車両を傾けるときや保持するとき感じる重さ
- 突き上げ感 - グリップ部の振動の挙動

結果は、曲げ部とグリップ部間の肉厚が4.3mmと厚く、グリップ部の肉厚が3.0mmと薄い仕様Aが、最もバランス良く高い評点を得ていることが分かる。仕様Aの操舵感や突き上げ感の向上は、グリップ部が薄肉になったことで軽量化し、慣性マスの小さくなり、減衰が早くなったことが理由と考えられる。一方で、剛性感は仕様Aと仕様Cで曲げ部とグリップ部間までの肉厚は同じであるものの、評点には差がある。そこで、操縦安定性評価時の挙動を再検証するため、高速で繰り返し負荷を与えて荷重と変位の関係を調べた。その動的剛性評価結果を図9に示す。

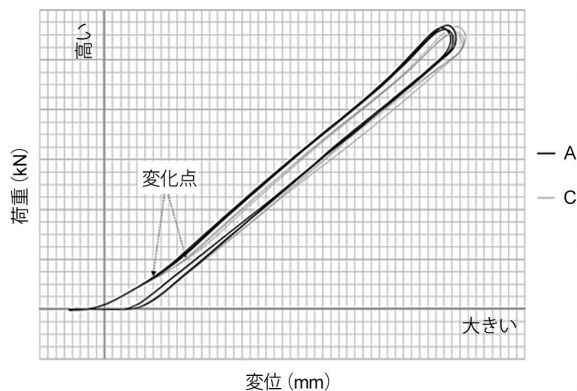


図9 前後方向での動的剛性評価結果

試験速度は1000mm/min、負荷方向は車両の前後方向で負荷は5回連続して与えた。その結果、ハンドルの変形挙動にヒステリシスが存在することが明らかになった。試験速度が大きいほどヒステリシスの面積は大きくなり、剛性の変化点が生じる。剛性の変化点が発生する荷重が小さいと感知しにくい、比較的大きな荷重域で発生すると、剛性が変化したことを認識し、違和感を覚えるものと考えられる。

この結果から、実際に乗車時に発生しているハンドルの挙動には、変位速度依存性があり、ハンドルのグリップ部の自重もその挙動に影響を与えることが示唆される。グリップ部はハンドル取り付け部から遠く、ハンドルのグリップ部の自重を小さくすることは、慣性モーメントを小さくすることにつながる。ここでハンドルのグリップ部の重量を w 、ハンドル全体の重量を W とした場合、 $w \leq 0.12W$ となるものは操縦安定性が良好な結果が得られることが整理できた。

4 アルミニウム材質の選定

構造材として用いられるアルミニウム合金は各種あるが、高強度かつ高延性、さらに加工性も良くアルマイトも可能な特性を有する合金となると選択肢は限られ、熱処理型合金の2000、7000系から選択することになる。これらの合金は航空機の胴体や翼の材料として開発され、今でも広く採用されており、一部は二輪車の車体構造部材として実績がある。7000系合金は使用状態によって応力腐食割れの懸念がある。応力腐食割れとは腐食環境下で引張応力が同時に作用すると境界が優先的に破壊する現象であり、合金成分だけでなく、金属組織も影響因子のひとつである。応力腐食割れ感受性を低下させる添加元素としてはZr、Cu、Mn、Znなどが知られており、これらの添加元素によって強度や耐応力腐食割れ性を向上させたA7050をベースに結晶粒微細化によりさらに優れた特性を有する開発合金を採用した。

5 熱処理工程の選定

アルミニウム製テーパーハンドルの製造工程の比較を図10に示す。ハンドルは、押出材を引抜加工してからスウェーピング加工し、その後、曲げ加工を行った後に熱処理をして強度を発現させている。スウェーピング加工や曲げ加工時には、素材は高い加工度で塑性加工される。したがって縮管しやすさ、曲げやすさを考慮して加工前に都度、焼鈍を行うのが一般的である。さらに、強度を発現させるための熱処理も溶体化処理と時効処理から成っており、曲げ加工が完了した後に行えば、製品の変形や、変形した製品を矯正する工程の追加も必要になる。そこで、材料から表面処理に至るまで各製造工程における熱履歴の整理を行い、ハンドルに求められる機械的性質と寸法精度が確保できる工程と熱処理条件の組み合わせを設定し、量産性の検証を行った。

その結果、曲げ加工前に行っていた焼鈍工程を廃止して、溶体化処理後、定めた時間内に曲げ加工を完了させることで、従来工程と同等以上の曲げ加工性が確保できることを見出した。さらに詳細に調べてみると、この工程で製造した場合、曲げ工程における扁平率が従来工程より小さくなることも明らかになった。この知見により、従来工程では、ハンドルを曲げた後に溶体化していたために、矯正工程が必要であったが、これも不要となり、工程全体で熱処理時間の短縮と製品の寸法精度向上に寄与している。熱処理時間の短縮は製造時のエネルギー削減にも効果がある。

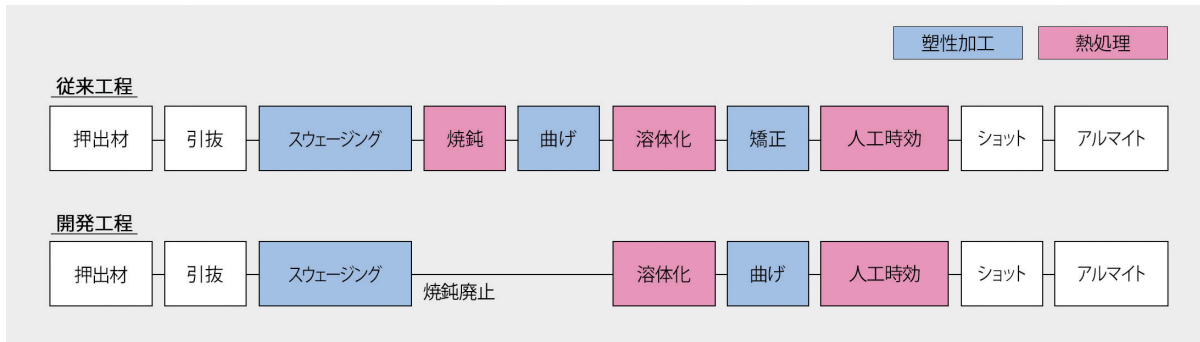


図10 最適化した熱処理の工程

6 熱処理工程の違いが曲げ加工性に及ぼす影響

溶体化処理後と焼鈍後の材料が曲げ加工性に及ぼす影響を整理するため、それぞれの応力歪線図を示す（図11）。

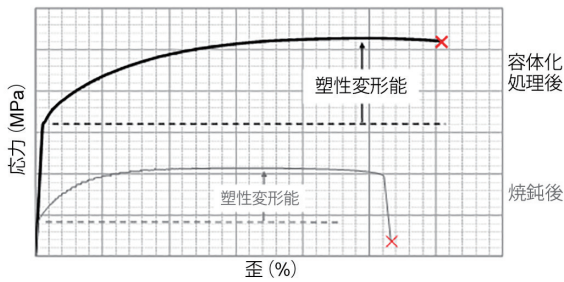


図11 熱処理の違いにおける応力歪線図

溶体化処理後の機械的性質は焼鈍後よりも全体に高い値を示すものの、延性は溶体化処理後のほうが大きく、引張強さから0.2%耐力を引いた塑性変形能は溶体化処理後のほうが大きい。金属材料は、曲げ加工中に加工硬化しているが、溶体化処理後のほうが同じ歪み量でも強度上昇が著しく加工硬化係数が高い。加工硬化係数はn値と呼ばれ、成形性の良否を表すパラメーターのひとつである。n値の高い材料は、加工中に加工硬化し、加工時の歪みが局所集中しにくい性質があるため、加工範囲が全体にわたり均一に変形しながら加工される。ハンドルの曲げ加工の場合は加工中のアルミニウム管の扁平精度が向上し、曲げ外周R側への歪集中が抑制される。したがって従来工程を上回る曲げ加工性と従来工程を下回る扁平率が確保できていると考えられる。確認のため、各工程における断面金属組織と導電率の比較を行った（図12、13）。焼鈍後は溶体化処理後よりも導電率が高く、金属間化合物の粗大析出が進んだ状態と判断できる。溶体化処理後の金属組織は粒界が明確に観察できないが結晶粒径には粗大化がみられず、導電率も低いことから金属間化合

物が過飽和に固溶している状態であると判断できる。この結果からも開発した工程では曲げ加工時に金属間化合物が粗大析出しておらず、破壊の起点となるサイズの金属間化合物が少ないために溶体化処理後のほうが延性が高いことが裏付けられた。

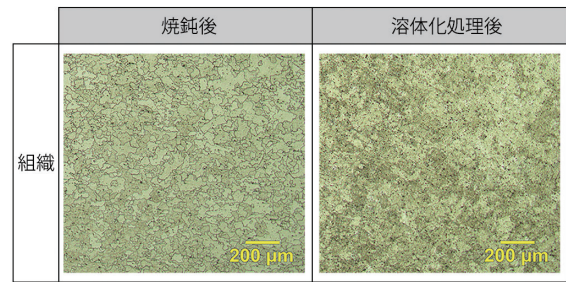


図12 熱処理の違いにおける断面金属組織

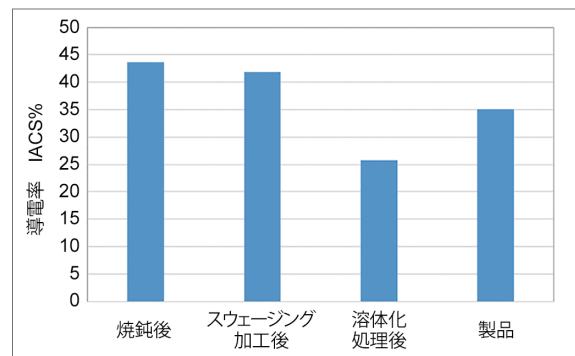


図13 工程における導電率の変化

7 おわりに

モーターサイクルの操縦安定性を向上させるため、ハンドルのさらなる軽量化に取り組み、従来モデルと比較して17%軽量で高い強度と剛性をバランスするハンドルの量産化が可能になった。本技術は、高強度のアルミニウム合金を使い断面を変化させつつ適用する技術であり、ハンドルに限らず7000系合金を加工、熱処理する部品に広く適用可能であることから、今後の輸送機器部品の軽量化に役立つものと考え

られる。今回の開発ではライダーが感じる挙動を台上試験で再現することを試み、解明を進めることで、取り付け部の断面二次モーメントとグリップ部の重量には相関性があることを明らかにした。一般的に肉厚を薄くすることで断面二次モーメントは小さくなり、部材の剛性は低下する傾向にあるが、変形時の挙動を詳細に解析することでライダーを不安にさせない剛性感、操舵感を有し、突き上げ感の少ないハンドルを実現することができた。二輪車の開発においては、操縦安定性などに代表される官能評価結果を分析し、規則性を探していくことは重要であり、今後もこの知見を部品の軽量化開発に生かしていく予定である。このハンドルを搭載した機種であるYZ450Fは、ライダーが運転していて疲労が少ないとの評判も得ており、このハンドルが搭載されたモーターサイクルの商品魅力向上にも貢献することができた。

■著者



奥田 裕也

Yuya Okuda

モビリティ技術本部

MS統括部

MS開発部



鈴木 貴晴

Takaharu Suzuki

パワートレインユニット

コンポーネント統括部

材料技術部