

アルミ鍛造製コネクティングロッドへの6000系材料適用

Application of 6000 series aluminum alloy to forged connecting rods

大島 かほり 栗本 幸広 村山 友貴

要旨

二輪車サスペンション部品であるコネクティングロッドは、路面からの入力を受取る機構の一端を担っており、高強度を求められる部品である。加えて、使用環境によっては水や土などが付着し、耐食性も必要である。従来、当社オフロードコンペティションモデルであるYZシリーズには、高強度と高耐食性を成立させるため、2000系アルミ合金に表面処理を施したコネクティングロッドを採用してきた。しかし、2000系アルミ合金の材料費、および表面処理費は部品のコストアップにつながる。本稿では高強度6000系アルミ合金に着目し、部品機能(高強度、高耐食性)を満たしながらも材料費と表面処理費削減によるコストダウンを達成した例を紹介する。

Abstract

Connecting rods, a component of motorcycle suspension, are part of a mechanism that absorbs input from the road surface. These components also require high strength. In addition, depending on the environment where water, and soil etc., may adhere to it, corrosion resistance is also necessary. Previously, the YZ series, our off-road competition model, adopted 2000 series aluminum alloy connecting rods with high strength and corrosion resistance achieved through surface treatment. However, the material and surface treatment cost of 2000 series aluminum alloy leads to a cost increase of the parts themselves. This paper focuses on high-strength 6000 series aluminum alloys and introduces examples of achieving cost reductions by reducing material and surface treatment costs while satisfying component specifications (high-strength and corrosion resistance).

1 はじめに

アルミニウムは鉄鋼に比べて比重が小さく、燃費向上のため輸送機器の軽量化に必要な不可欠な材料である。加えて、素材耐食性も良好であるため、外観上の要求が厳しい部品に対しても適用されている。当社では、ユーザーが走行、取り回しを含めて取り扱い時に重量を感じやすいことや、外観上の露出が多い部品が多いことから、二輪車にアルミニウムを広く採用してきた。特にオフロードコンペティションモデルのYZシリーズは、製品特性上、軽量化要求が高く、高強度アルミニウム(2000系合金や7000系合金)を多く採用している。リヤサスペンション部品のコネクティングロッドもその1つで、従来2000系合金を採用し、鍛造によって製造している(図1)。



図1 YZシリーズとコネクティングロッド

一方で、近年アルミニウムメーカー各社では、2000系合金に迫る強度を有し、かつ耐食性や耐応力腐食割れ性に優れる

高強度6000系合金の開発が進んでいる。四輪業界では、サスペンション部品において鉄鋼から高強度6000系合金への切替が1990年代頃から始まった^[1]。現在では上級モデルのみならず、大衆モデルにも展開されており、国内以外にも中国やアメリカ等、世界各国の鍛造メーカーで高強度6000系合金を採用した鍛造部品が製造されており、大型部品も増加している。

本稿では、YZシリーズ向けのコネクティングロッドに高強度6000系合金を適用し、部品機能を満たしながらもコストダウンを実現した例を紹介する。

2 課題と解決手段

2-1. 現状課題

コネクティングロッド単体部品には、大きく分けて3つの開発要求【強度特性、腐食特性、コスト】がある。当社では、強度特性と腐食特性、加えて調達性の観点から、従来A2014FD-T6に塗装を施した仕様を採用してきた。高力合金とも呼ばれるA2014は十分な強度特性を有するが、一般的に2000系合金は材料費が高く、また、塗装を採用していることで部品コストが高い。一方で、6000系合金は比較的安価な材料で、耐食性が良好な材料であり、材料費と塗装費が削減できる可能性がある。しかし、代表的な6000系鍛造合金であるA6061FD-T6では強度特性の開発目標を満足できない

(表1^[2,3])。部品形状を変更することで部品強度を維持する手段もあるが、この場合、部品重量が増加するため、軽量な車体が要求されるYZシリーズには採用が難しい。

表1 強度特性、腐食特性

材種	強度特性 (機械的性質)			腐食特性	
	引張強度	耐力	伸び	耐食性	耐応力腐食割れ性
A2014FD-T6	450 MPa 以上	380 MPa 以上	8% 以上	D	C
A6061FD-T6	265 MPa 以上	245 MPa 以上	10% 以上	B	A
開発目標	350 MPa 以上	300 MPa 以上	10% 以上	—	—

※腐食特性は良好なものから順にA～Dの4ランクに分類。

2-2. 解決手段

2-1節より、6000系合金採用における課題は強度特性であることがわかる。そこで、高強度6000系合金に着目した。

高強度6000系合金は、過剰Si型と呼ばれる6000系合金に分類される。今回はA6061に対して主要元素であるSi、Mg、Cuと、遷移元素であるCr、Mnの成分添加量を主に変更したものを採用した。SiとMgは人工時効処理によってMg₂Siとして析出し、6000系合金を高強度化する役割を担っており、Cuはその析出を促進する効果があると言われている^[4]。また、CrやMnなどの遷移元素を添加することで、一般的には強度特性低下の影響を及ぼすと言われる再結晶組織の成長を抑制する効果が見込める^[5,6]。

また、強度特性は合金成分だけでなく、鍛造および熱処理条件によっても左右される。強度変化は、鍛造と溶体化処理時の再結晶組織の成長、溶体化処理と人工時効処理時の析出現象が起因する。本合金においても適切な鍛造・熱処理条件はあるが、製造上は特別管理となり、コストアップの可能性はある。したがって、本研究では製造コストを増加させることなく、強度特性を高める鍛造・熱処理条件も検討した。

3 試験方法と結果

3-1. 製造条件

コネクティングロッドの製造工程を図2に示す。従来材A2014は全工程を通したものを、候補材高強度6000系合金(以下、High Strength 6000 seriesの略称としてHS6000と記載)は塗装工程を除いたものを完成部品とした。ここで、HS6000においては、素材加熱や熱処理条件の温度を高温化することで高強度を狙えるが、一方で製造条件が特殊になるためコストアップが懸念される。そこで、製造コストの増加を抑えながら強度特性を高める鍛造・熱処理条件を見出した

め、鍛造前の素材加熱条件と熱処理条件が異なる3条件の比較を行った(表2)。

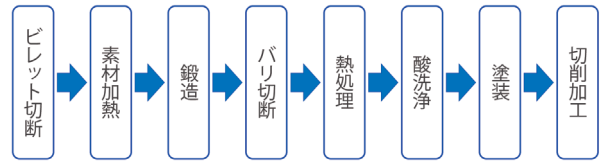


図2 製造工程(鍛造～切削加工)

表2 鍛造および熱処理条件

サンプル	鍛造		T6			強度向上	コスト低減
	素材加熱	プレス機	溶体化	焼入れ	人工時効		
A2014	生産条件	生産条件	生産条件	生産条件	生産条件	-	-
HS6000条件A	高温	大型機	高温	A6061類似	HS6000向け	A	C
HS6000条件B			低温(A6061類似)			B	B
HS6000条件C	低温	小型機	C			A	

※オレンジ色は強度向上に、青色はコスト低減に寄与する項目

※強度向上とコスト低減は効果が高いものから順にA～Cの3ランクに分類

各条件の概要は以下のとおりである。

<条件A>

鍛造条件、熱処理条件いずれもHS6000に適しており、高強度が見込める。工程レイアウト上、大型プレス機を使用するために高コストとなる。

<条件B>

鍛造条件は条件Aと同様である。熱処理条件は溶体化温度を低くしており、十分な強度が得られない可能性はあるが、一般材A6061と類似条件のためやや低コストとなる。

<条件C>

鍛造条件は素材加熱温度が低く、熱処理条件は溶体化温度が低いため、十分な強度が得られない可能性がある。工程レイアウト上、小型プレス機が使用でき、かつ溶体化条件が一般材A6061と類似条件のため低コストとなる。

3-2. 金属組織

アルミニウムには塑性加工によって格子欠陥が導入されるが、加熱によりそれらが消滅したり、再配列が生じたりすることが一般的に知られている。この現象を進行させると再結晶と呼ばれる結晶粒が成長し、条件によっては粗大化する。結晶粒が粗大化すると一般的には機械的性質が低下するため、再結晶がコネクティングロッドのどの位置で成長しているかを確認した。

HS6000の条件A、B、Cにおいて、コネクティングロッドの金属組織を観察した。まず、条件Cを代表として部品全体を観察

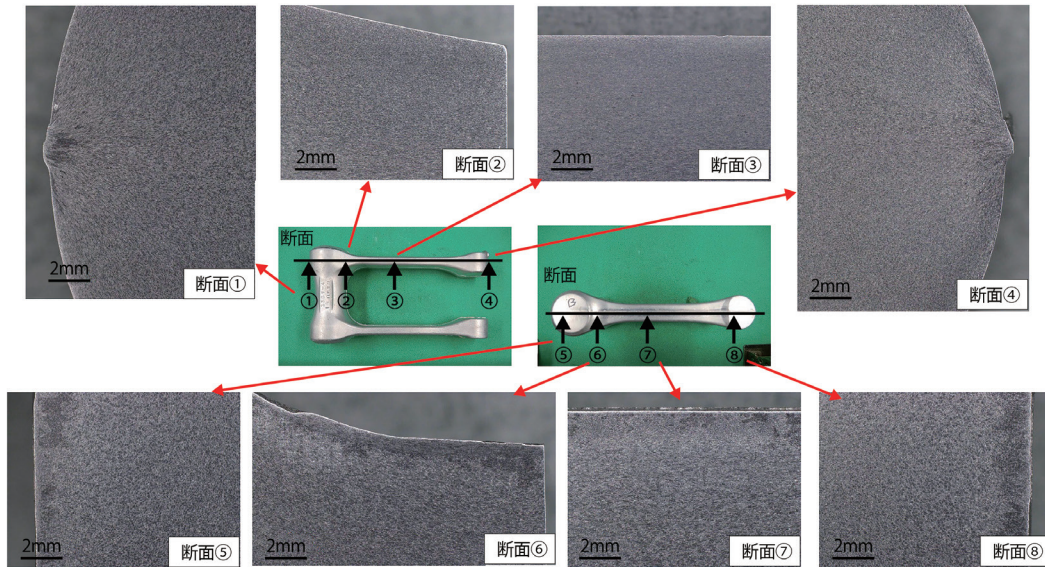


図3 HS6000 条件Cの金属組織観察

サンプル	条件A	条件B	条件C
金属組織			
再結晶組織の厚さ	1.9mm	0.5mm	1.5mm

図4 アーム部の金属組織観察

すると、表層の鍛造パーティングライン部分に再結晶組織が確認された(図3)。特に再結晶組織が明瞭に見られるアーム部のパーティングライン断面について、条件A、Bも金属組織を観察したところ、サンプルによって再結晶組織の厚さが異なることが確認できた(図4)。いずれのサンプルも内部には再結晶組織が確認されなかった。

3-3. 強度特性

3-3-1. 機械的性質

機械的性質を取得するため、引張試験を行った。試験は、万能試験機(島津製100kNオートグラフ)を用いて、荷重レンジ10kN、クロスヘッドスピード0.5mm/minで行った。試験片は、標点間距離20mm、板厚2.5mm、幅5.0mmとし、コネクティングロッドのアーム部より採取した。耐力は、ひずみゲージ測定値を採用した応力-ひずみ線図と、その弾性域0.2%オフセット線との交点から求めた。伸びは突合せ伸びとし、試験前後の標点間距離を投影機にて測定して算出した。A2014とHS6000条件A、B、Cの引張強度、耐力、伸びの代表値を比較した(図5)。

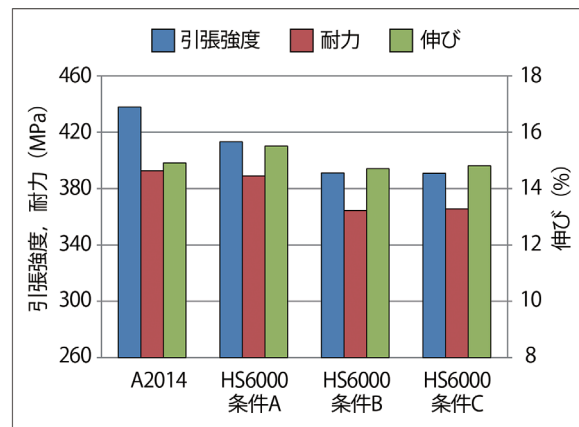


図5 機械的性質

A2014を基準にHS6000を比較すると、条件Aは引張強度のみ、条件B、Cは引張強度と耐力が6~11%程度低いが、伸びは同等である。A2014同等の強度は得られなかったが、開発目標はいずれの条件でも達成することができた。

また、HS6000の条件の違いに着目すると、条件A、Bの結果から、溶体化温度が高いほうが高強度となる。一方、条件B、C

の結果から、素材加熱温度が異なっても機械的性質への影響は小さいことがわかる。

3-3-2. 実体強度

3-2節で観察したように、アーム部のパーティングラインには再結晶組織が見られる。再結晶組織は低強度であると言われるが、引張試験では試験片採取位置の関係上、表層の再結晶組織の影響は無い。そこで、再結晶組織の影響を評価するため、実体強度試験を行った。試験は、アーム端部に負荷してパーティングラインが曲がるようにし、反対側のアーム部に接触するまで負荷を続けた(図6)。

試験時の最大荷重で比較すると、引張試験結果と同様に、最大荷重はA2014>>HS6000条件A>HS6000条件B≒HS6000条件Cの関係である(図6)。HS6000の再結晶組織の厚さは条件B>条件C>条件Aであったことから、最大荷重との関係性は見られず、差異も3%程度である。したがって、コネクティングロッドの実体強度に対して表層の再結晶組織の影響は小さいと言える。

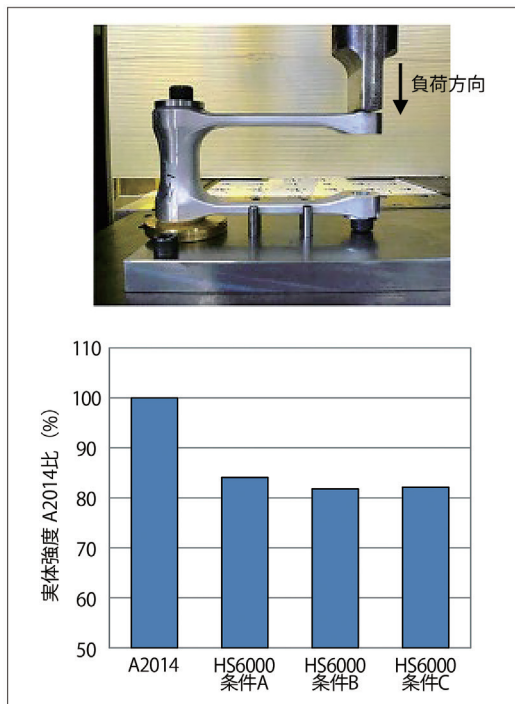


図6 実体強度の試験方法と結果

3-3-3. 疲労特性

機械的性質と実体強度の結果を踏まえ、疲労特性は最も引張強度が低いHS6000条件Cを試験対象とした。疲労試験は、平面曲げ疲労試験機(東京衡機製PBF-30C型)を用いた応力比-1の両振りとし、14PSN試験法に準拠して行った^[7]。繰返し数が 10^7 回に達した場合は試験を打ち切り、その応力を疲

労限とした。試験片はコネクティングロッドのアーム部より採取した。疲労限は耐力の約30%^[8]を想定していたが、44%にあたる162MPaであり(図7)、想定を上回る結果であった。

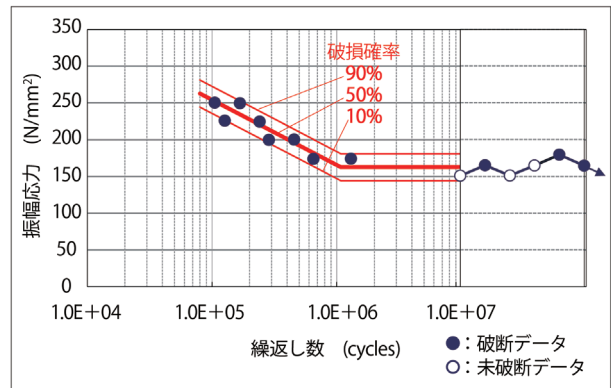


図7 平面曲げ疲労試験結果

3-4. 腐食特性

腐食特性は、A2014と、再結晶組織の厚さが最大であったHS6000条件Aを比較試験した。

3-4-1. 耐食性

外観の耐食性を比較するため、塗装の影響を含む部品耐食性と、加工面を模擬した素材耐食性を試験した。試験はJIS Z 2371に準拠した塩水噴霧試験とした。

部品耐食性は、コネクティングロッド完成品を試験片とした。A2014は塗装有り、HS6000は塗装無しの仕様である。試験時間は1時間、2時間、4時間、8時間、24時間、48時間、72時間、96時間とした。各時間で試験機を停止させて試験片を水洗し、目視にて腐食発生有無を確認後、試験機に試験片を戻して再開する方法で最大96時間まで実施した。A2014とHS6000いずれも24時間後に腐食発生が確認された(図8)。A2014は鍛造パーティングラインに白色の腐食生成物と変色を伴う腐食が発生し、96時間後にはその範囲が広がっ

サンプル	試験時間			
	0 hr	8 hr	24 hr	96 hr
A2014				
HS6000				

図8 部品耐食性試験結果

ていた。対して、HS6000は大部分に変色が発生し、96時間後には変色の濃化が進行した。外観上の腐食発生面積はA2014のほうが小さいが、腐食発生時間は同じであったことから、表面の変色は部品機能を低下させる腐食ではないことから、HS6000は塗装無しでも採用可能なレベルであると言える。

素材耐食性は、コネクティングロッドのアーム部を切り出した後、切削加工面を模擬して研磨をしたものを試験片とした。試験方法は部品耐食性と同様である。A2014は1時間後に薄い白色の変色が大部分に発生し、HS6000は4時間後に薄い白色の変色が一部に発生した(図9)。いずれも時間経過に伴って腐食が進行し、96時間後にA2014は大部分に白色の腐食生成物が発生し、HS6000は一部に発生していた変色が濃化した。この結果から、腐食発生時間が遅く、かつ腐食発生面積が小さいHS6000のほうが、素材耐食性が良好であると言える。また、部品耐食性の試験結果を振り返ると、塗装が有るA2014においてパーティングラインから腐食が発生して

おり、長期的には腐食によって塗装がはく離する可能性もある。塗装はく離の進行を想定すると、優れた素材耐食性を有するHS6000が好ましい。

ここで、A2014とHS6000の素材耐食性に差異がある要因の1つとして、自然酸化被膜の膜厚が関係している可能性がある。アルミニウムは周囲環境の酸素と反応して、表面に自然酸化皮膜を形成し、実用上優れた耐食性を示すことが一般的に知られている。両材料の膜厚を比較するため、オージェ電子分光法により表面から深さ方向の各成分の強度を測定した。測定元素は、主要元素および酸化皮膜と、洗浄しきれなかった表面の汚れを考慮し、Al、Cu、Mg、Si、O、Cとした。測定はサンプリングエリアを20 μm として鍛造肌と加工面の2箇所とした。ただし、A2014は塗装が有るため、鍛造肌の測定はしなかった。膜厚は、表面から、Oの最大強度が半減した深さまでとした。一般的に膜厚は数 μm と言われるが、A2014とHS6000の膜厚は10~30 μm であった(図10)。鍛造肌のほうが膜厚が厚い要因としては、鍛造や熱処理で高温にさらされて皮膜が成長したためと考えられる。また、素材耐食性はHS6000のほうが優れていたが、加工面の膜厚を比較するとA2014のほうが厚い。このことから、HS6000の優れた耐食性は、表面の自然酸化皮膜だけでなく材料の組成や金属組織によるものと推察する。

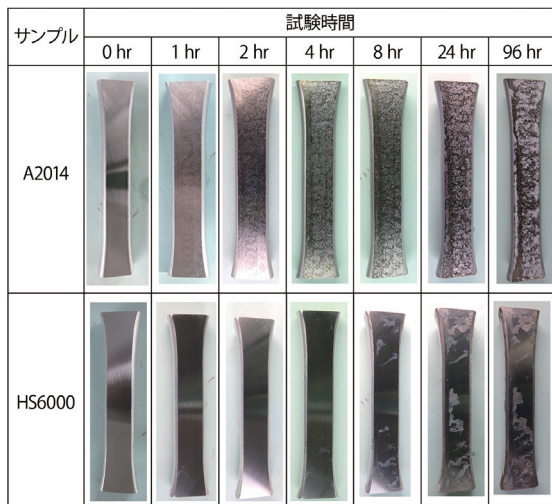


図9 素材耐食性試験結果

3-4-2. 耐応力腐食割れ性

A2014製コネクティングロッドに塗装が採用されていた理由は、軸穴のベアリング圧入部近傍のパーティングラインで応力腐食割れ発生が懸念されたためである。そこで本試験では、車両使用環境と破損が懸念される箇所を想定して、コネクティングロッドにベアリングを圧入した状態で長期間の塩水

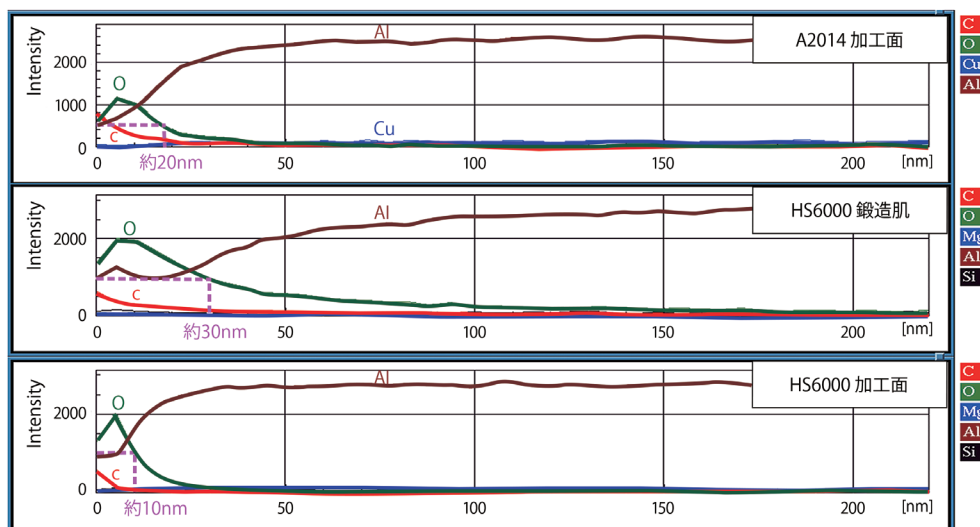


図10 深さ方向の元素分析結果

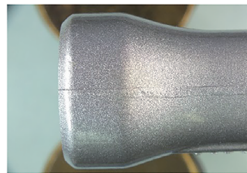
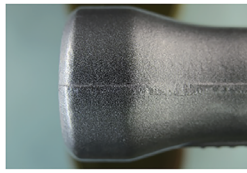

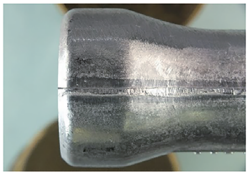


サンプル	試験時間		
	0 day	10 day	30 day
A2014			
HS6000			

図11 応力腐食割れ試験結果

噴霧試験を行った。試験時間は、愛知県刈谷市でのA5052大気暴露試験1年相当に必要な塩水噴霧試験期間が2日^[9]であることを参考に、5年相当の10日間とした。割れ発生有無の確認は、試験片を水洗後、実体顕微鏡にて実施した。A2014塗装有りとHS6000塗装無しはいずれも割れが発生しなかった(図11)。参考までに本試験を30日間まで延長したが、割れは発生せず、A2014塗装有りとHS6000塗装無しいずれでもコネクティングロッドにおける耐応力腐食割れ性は十分であることがわかった。

4 まとめ

HS6000は、強度特性ではA2014に劣る点はあるものの、開発目標より高い実力を有する。また、車両実走評価(耐久試験や衝撃試験等)においても問題は認められなかった。腐食特性においては、耐食性が良好で、実用上は部品機能を低下させるレベルの腐食まで進行しないことから、HS6000では塗装廃止の実現が可能であると判断した。なお、製造条件は鍛造時の素材温度が低く、小型プレス機を使用することがコスト面からも有利であるため条件Cを採用した。

以上の結果から、コネクティングロッドを高強度6000系合金に置換することで、既存の加工工程を変更することなく、材料費約20%削減と塗装廃止による部品コストダウンを達成した。本部品は、YZ450Fを筆頭に、YZシリーズに順次展開している。

高強度と高耐食性を兼備する材料であり、今回の事例を知見とし、今後はマリン製品やオフロードレクリエーション用ピークルも含む輸送機器全般に広く展開される技術となることを期待している。

■参考文献

[1]関口常久:軽量化のための非鉄金属の適用方法, 素形材

vol.53, No.8(2012), p.2-11

[2]JIS H 4140(1988), アルミニウム及びアルミニウム合金鍛造品

[3](株)日本アルミニウム協会:アルミニウムハンドブック, 第8版(2017)

[4]櫻井健夫, 小松伸也, 河野紀雄:Al-Mg-Si系合金の時効硬化挙動に及ぼす均質化処理温度と銅添加の影響, 軽金属vol.58, 9号(2008), p.433-438

[5]山田 始, 田中他喜男:Al-1%Mg-0.6%SiおよびAl-3%Mg合金の再結晶粒度に及ぼすCrの効果, 軽金属vol.38, 2号(1988), p.71-75

[6](株)日本アルミニウム協会:循環性に優れた6000系合金の創製に関する研究 遷移元素の統一

[7](株)日本機械学会:統計的疲労試験方法-JSME S 002-1994-

[8]布村成具:アルミニウムおよびアルミニウム合金の疲労, 軽金属vol.28, No.11(1978), p.566-574

[9]林直宏, 山下勝也, 小林弘明, 片岡泰弘:複合サイクル試験の腐食促進試験への適用, あいち産業科学技術総合センター研究報告2013, p.20-23

■著者



大島 かほり
Kahori Oshima
生産技術本部
材料技術部



栗本 幸広
Yukihiro Kurimoto
生産本部
製造技術統括部
PT技術部



村山 友貴
Yuki Murayama
モビリティ技術本部
MS統括部
MS開発部