

# 摩擦撈拌接合によるアルミニウム合金接合部の変色防止

坂村 勝, 大石 郁, 大川正巳<sup>\*1</sup>, 高橋謙治<sup>\*2</sup>, 津村卓也<sup>\*3</sup>, 中田一博<sup>\*3</sup>

## Prevention of Discoloration at Weld Zone of Aluminum Alloy by FSW

SAKAMURA Masaru, OHISHI Kaoru, OKAWA Masami<sup>\*1</sup>, TAKAHASHI Kenji<sup>\*2</sup>, TSUMURA Takuya<sup>\*3</sup> and NAKATA Kazuhiro<sup>\*3</sup>

Window frames of ships are mainly made of A6000-type aluminum alloy. Aluminum alloys are TIG welded. When these materials are anodised in order to improve corrosion resistance after TIG welding, the color of TIG joint zone changes. To prevent the discoloration, we applied FSW to A6000-type aluminum alloy. Consequently, we could restrain the discoloration. Next, to investigate the cause of discoloration, we applied FSW to A2017, A5052 and A7075. These alloys were anodized after joined by FSW. In the case of A5052, the color of FSW joint zone didn't change. But, in the case of A2017 and A7075, the color of FSW joint zone changed conspicuously. The cross section of these alloys was observed. We could obtain the result that one of causes of discoloration was the difference of thickness of anodized film and the difference of elements in the anodized film between the joint zone and the base metal zone.

船室窓枠は、主としてA6000系アルミニウム合金をTIG溶接で接合し、耐食性向上のために陽極酸化処理を施して製造されている。しかし、この際に接合部に変色が発生し問題となっている。この対策として、非溶融接合である摩擦撈拌接合(FSW)の適用を試みた。その結果、A6000系合金ではFSW適用により変色が抑制できることが分かった。次に、変色原因を追究すべく、A2017, A5052, A7075にFSWを適用し、陽極酸化処理を施した。その結果、A5052はほとんど変色が発生しなかったのに対し、A2017, A7075では大きな変色が発生した。断面観察の結果、接合部と非接合部の陽極酸化皮膜の膜厚差及び皮膜中の成分元素差が変色の一因であることが分かった。

キーワード：摩擦撈拌接合，アルミニウム合金，陽極酸化処理

### 1. 緒 言

アルミニウム合金の表面に、より良好な耐食性、装飾性や耐摩耗性を付与する目的で行われる表面処理に陽極酸化処理がある<sup>1)</sup>。陽極酸化処理は船室窓枠の耐食性向上のためにも適用されている。その製造工程は、押出型材の曲げ加工、TIG溶接、余盛除去、陽極酸化処理である。しかし、陽極酸化処理を施した際に写真1に示すように溶接部が変色を起こし、商品価値が著しく低下するという問題が発生している。これまでこの問題を解決できる手法は全くない状態であった。

佐藤らは、アルミニウム合金の陽極酸化処理では合金成分や熱処理状況によって色調が変化するとしている<sup>2)</sup>。TIG溶接では溶加材を加えること、及び溶接部が凝固組

2007. 7. 31 受理 加工技術研究部

\*1 総務部営繕室

\*2 株式会社機械製作所

\*3 大阪大学接合科学研究所

織となっていることから、非接合部と溶接部で成分、組織が異なり、これらが原因で変色が発生していると推測した。

一方、摩擦撈拌接合(以下、FSW)は、1991年に英国の溶接研究所(The Welding Institute-TWI)により開発された接合技術で、接合ツールによる摩擦熱で軟化させた母材同士を塑性流動により一体化させる固相接合法である<sup>3)</sup>。現在、アルミニウムの接合、鉄鋼材料の接合、鉄鋼材料とアルミニウムの接合や鉄鋼材料とマグネシウムの接合など、その実用化を見据えた多くの研究がなされている。

そこで本研究では、固相接合であり、溶加材を用いないFSWに注目し、船室窓枠用として多用されているA6000系合金を対象として、TIG溶接をFSWに代替した際の変

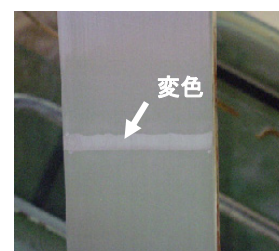


写真1 TIG溶接部の変色 (A6061)

色抑制効果について検討を行った。また、各種アルミニウム合金にFSWを適用し、その後、陽極酸化処理を施して、材質による変色度合いの差異を調査することで変色メカニズム及び変色抑制方法についての考察を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 供試材

供試材はFSW適用の効果確認用としてA6061、比較用としてA2017、A5052、A7075を選び、大きさは150mm×100mm×3mmとした。それぞれの材料の化学成分を表1に示す。

表1 供試材の元素分析結果 (%)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
A2017	0.27	0.22	4.70	0.58	0.58	0.12	0.16
A5052	0.10	0.36	0.02	0.03	2.09	0.42	0.02
A6061	0.59	0.25	0.40	0.10	0.71	0.32	0.04
A7075	検出不可	0.21	1.52	0.03	2.12	0.24	6.29

### 2.2 接合

供試材を脱脂した後、大阪大学接合科学研究所所有の荷重制御型摩擦攪拌接合装置にて突合せ接合を行った。各材質の接合条件を表2に示す。各材質ともバリ発生が少なく、接合可能な条件とした。接合に使用したツールはショルダ径15mm、プローブ径は根元5mm、先端3mm、プローブ長さ2.9mm、材質はSKD61とし、プローブには逆ネジ加工を施した。なお、従来品のA6061-TIG溶接材では溶加材としてA5183-BYを用いている。

表2 各材質の接合条件

材質	荷重(KN)	回転数(rpm)	速度(mm/s)	ツール角度
A2017	12.3	1250	3.3	前進角3°
A5052	7.4	750		
A6061	4.9	1250		
A7075	9.8	750		

### 2.3 陽極酸化処理

接合された試料は平面研削盤で粒度400のGC砥石にて研削した後、陽極酸化処理方法の一つであるミタニライト処理を施した。ミタニライト処理は、低重合アクリル樹脂組成物を含む硫酸系電解液を使い、0~15℃の温度で被加工体を陽極として通電し、被加工体表面に良質な陽極酸化皮膜を形成する手法であり、従来の陽極酸化処理では膜成形が困難であったA2000系やA7000系合金にも均一な陽極酸化皮膜形成が可能である。

### 2.4 評価

得られた試料の接合部と非接合部の色の差をMacbeth製測色色差計COLOR-EYEで測定した。なお、接合部の任

意の1点と非接合部の任意の1点を1組として、1試料あたり10組の測定を行った。また、得られた試料の断面観察及び成分分析については㈱日立製作所製S-4100静電界放射型走査電子顕微鏡(SEM)及びSEMに付属している㈱堀場製作所製エネルギー分散型X線分析装置(EDX)EMAX-ENERGYを用いて行った。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 FSW適用の効果

A6061にFSWを適用し、陽極酸化処理を施した試料の外観を写真2に示す。写真2をよく見るとやや変色しているものの、写真1のTIG材と比較して変色は大幅に抑制されていることが分かる。この試料の色差測定結果をTIG材の結果と合わせて図1に示す。図1より明らかにFSWの方が色差が小さく、FSW適用により変色を抑制できることを数値によって明確にできた。



写真2 A6061-FSW材の外観

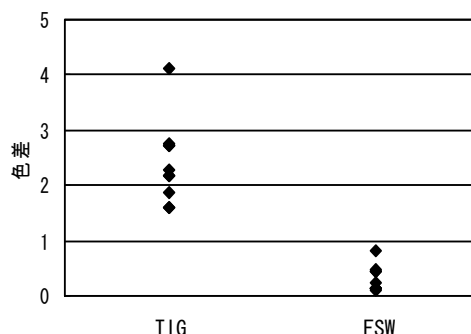


図1 A6061 TIG材とFSW材の色差測定結果

### 3.2 材質による変色度合いの差異

A2017、A5052、A7075にFSWを適用し、陽極酸化処理を施した試料の外観をそれぞれ写真3~5に示す。A5052ではほとんど変色が認められないのに対し、A2017、A7075では変色しており、特にA2017では変色が著しいことが分かる。図2に色差測定結果をA6061-TIG及びA6061-FSWの結果と合わせて示す。図2からもA2017及びA7075では変色が大きいことが分かる。また、A6061に比しA5052



写真3 A2017-FSW材の外観



写真4 A5052-FSW材の外観

の方が変色が若干少ないことも分かる。

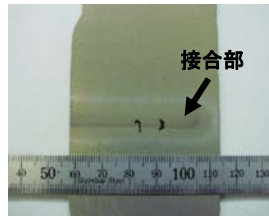


写真5 A7075-FSW材

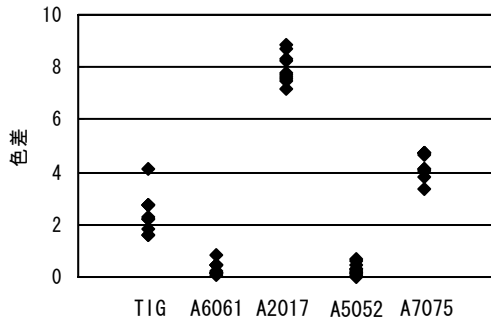
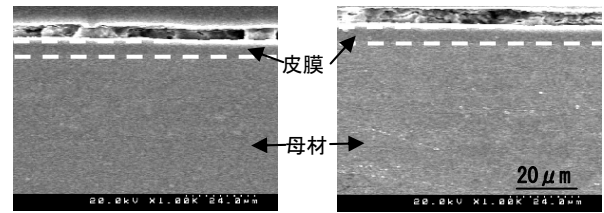


図2 各種材質の色差測定結果

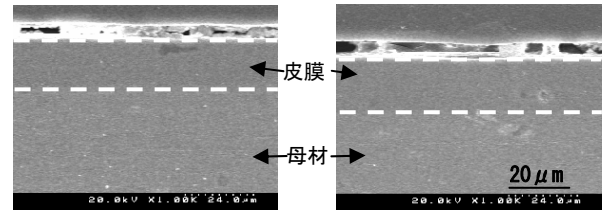
### 3.3 変色原因及び変色抑制対策

#### 3.3.1 材質による陽極酸化皮膜の膜厚差

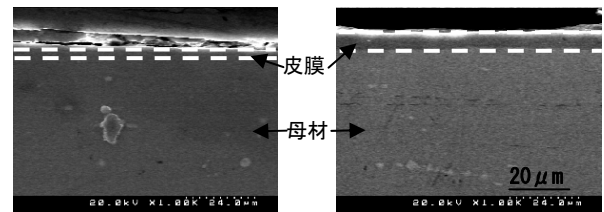
前述の通り、A5052、A6061、A6061-TIG、A7075、A2017の順で変色が大きくなることが分かった。この原因を調べるために、各試料の断面をSEMで観察した。写真6に各材質の断面SEM写真を示す。A2017については明らかに非接合部の陽極酸化皮膜が薄くなっていることが分かる。他の材料については明確な差異を判別しにくいので、それぞれ非接合部及び接合部の陽極酸化皮膜の膜厚をSEM像から5ヶ所測定し、その平均値を求めた。図3に(接合部膜厚平均値-非接合部膜厚平均値)と色差の平均値の相関を示す。図3より膜厚差が大きいほど色差も大きくなっており、変色の原因の一つとして非接合部と接合部の膜厚差が挙げられると考えられる。次に、材質によって陽極酸化皮膜の膜厚が異なることから、(接合部膜厚平均値-非接合部膜厚平均値)を接合部膜厚平均値で除して膜厚差を標準化した値を求め、これを膜厚差率と定義した。図4に膜厚差率と色差の平均値の関係を示すが、膜厚差率と色差の間には明確な相関は認められなかつ



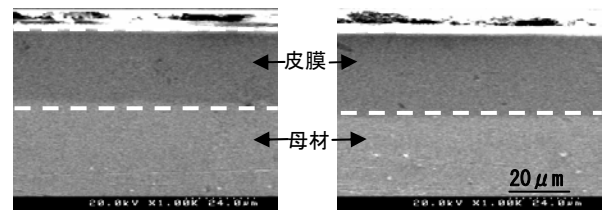
非接合部 A6061-TIG 接合部



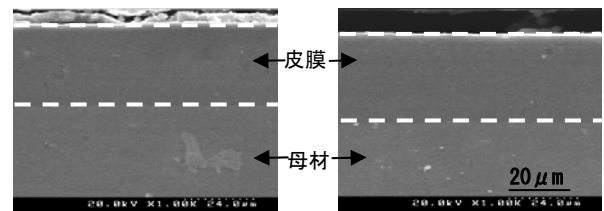
非接合部 A6061-FSW 接合部



非接合部 A2017-FSW 接合部



非接合部 A5052-FSW 接合部



非接合部 A7075-FSW 接合部

写真6 各材質の断面SEM写真

た。これらの結果より、接合部、非接合部の膜厚に関係なく、接合部と非接合部の膜厚差そのものが変色の大小

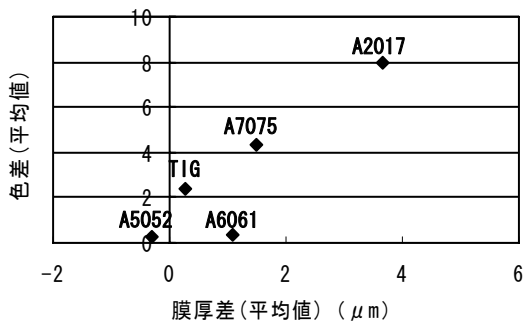


図3 各材質の膜厚差と色差の相関

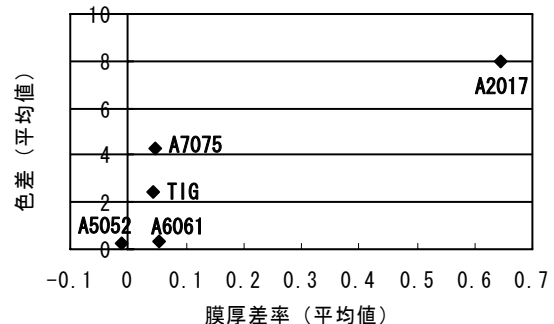


図4 各材質の膜厚差率と色差の相関

に影響を及ぼしているものと考えられる。しかし、接合部と非接合部で、陽極酸化皮膜の膜厚に差異が発生する原因については、今後更なる究明が必要である。

### 3.3.2 材質による陽極酸化皮膜中の成分元素の差異

接合部皮膜及び非接合部皮膜中の元素分析をEDXで実施した。簡易定量分析の結果概要を表3に示す。A5052, A6061では非接合部皮膜と接合部皮膜で主要成分元素量はほぼ同レベルである。A2017では接合部皮膜の方がSiが若干少なくなっており、A7075では接合部皮膜の方がZn, Cuが多くなっている。また、A6061-TIG材については、接合部皮膜の方がMgが多くなっている。これは溶加材として用いたA5183-BY中にMgが約5%添加されているため、接合部の方が非接合部よりもMgが多くなっていることに起因すると考えられる。EDXによる母材の簡易定量分析によって、接合部の方が非接合部に比しMgが多いことを確認している。

アルミニウム合金の陽極酸化皮膜の発色について佐藤らは、皮膜中に合金元素が分散されているために光が散乱、吸収されて発色するとしている<sup>2)</sup>。変色の少なかったA5052及びA6061では皮膜中の成分元素は接合部と非接合部でほぼ同レベルであり、変色の著しかったA7075, A2017では皮膜中の成分元素が接合部と非接合部で異なっていた。これらの結果より、皮膜中の成分元素量の差により光の散乱、吸収状態が変わり、変色が発生したものと考えられる。

表3 供試材の元素分析結果 (%)

材質	元素	接合部皮膜	非接合部皮膜
A5052	Mg	0.27~0.36	0.27~0.36
A6061	Mg	検出不可	検出不可
	Si	0.51~0.60	0.50~0.55
A2017	Si	0.28~0.40	0.57
	Cu	0.64~1.07	0.65~0.97
A7075	Cu	0.52~0.67	0.22~0.48
	Zn	2.64~2.96	1.34~2.21
A6061-TIG	Mg	0.26~0.50	検出不可

### 3.3.3 材質による皮膜形成メカニズムの差異

陽極酸化皮膜形成のメカニズムを図5に示す。陽極酸化処理では、図5のa→b→c→dのように、金属/酸化物境界で新しい皮膜が形成されるとともに、酸による溶解によって細孔が形成されるとされている<sup>2)</sup>。A5052, A6061では接合部皮膜と非接合部皮膜で成分元素がほとんど同一であった。これはMgやSi等の成分元素の酸による溶

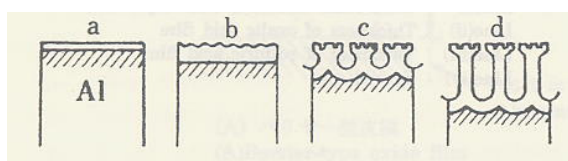


図5 陽極酸化皮膜の形成過程

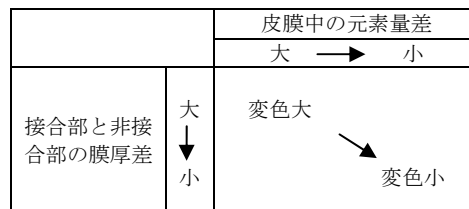
出量が接合部と非接合部でほとんど同レベルであったためであると考えられる。一方、A7075やA2017では接合部皮膜と非接合部皮膜で成分元素量が異なっていた。これはZn, Cu, Si等の成分元素の酸による溶出量が接合部と非接合部で異なっていたためであると考えられる。

栗原らはA2024合金において、FSWの攪拌部に近い熱影響部でAl<sub>2</sub>CuMgが析出し、耐孔食性が低下するとの報告をしている<sup>4)</sup>。A2017やA7075において接合部と非接合部で成分元素の酸による溶出挙動が異なったのは何らかの析出物が原因であるとも考えられる。このことを確認するためにA2017, A7075の接合部及び非接合部をEDXにより面分析したものの、析出物の検出はできなかった。析出物の確認については今後更なる観察及び考察が必要である。

### 3.3.4 変色抑制についての考察

表4に、今回の解析結果から得られた変色の推定原因を定性的に示す。今回の結果からは、変色を抑制するためには陽極酸化皮膜の膜厚を接合部と非接合部で同レベルとし、皮膜中の成分元素量を接合部と非接合部で同レベルとする必要があることが分かった。従って、船室窓枠用として多用されているA6000系合金で、接合部の変色を更に抑制するには、接合部と非接合部の膜厚が同一で、かつ、膜中の成分元素量が接合部と非接合部で同一の陽極酸化皮膜を形成させる必要がある。

表4 変色の定性的推定原因



一方、筆者らは、これまでに、FSW接合時の入熱量と色差に何らかの相関があることを確認しており<sup>5)6)</sup>、同一膜厚、同一成分元素を有した陽極酸化皮膜を形成するための一つの手法としてFSW接合時の入熱の最適化が挙げられると考えている。このことについては今後更なる研究を行っていく予定である。

## 4. 結 言

- 1) 船室窓枠用として用いられているA6000系合金にFSWを適用し、陽極酸化処理を施したところ、従来法であるTIG溶接に比し、接合部の変色を抑制することができた。
- 2) A2017, A5052, A7075にFSWを適用し、陽極酸化処理を施したところ、A5052ではほとんど変色が発生しなかったのに対し、A2017, A7075では変色が発生し、特に、A2017では著しい変色が発生した。

3) 変色の原因を調べるために、断面観察を実施した。その結果、接合部と非接合部の陽極酸化皮膜の膜厚差及び成分元素量差が大きいほど変色が大きくなることが分かった。

本研究は大阪大学接合科学研究所共同研究員制度を利用して行いました。

## 文 献

- 1) (財)日本規格協会：アルミニウムのおはなし，2005，p. 200.
- 2) 佐藤敏彦，神長京子：新アルマイト理論，カロス出版，1997，p. 17-97.
- 3) W.M.Thomas et al.：International Patent Appl. No. PCT/GB92/02203.
- 4) 栗原伸之佑，佐藤裕，粉川博之：溶接学会概要集，**79**，72（2006）.
- 5) 坂村勝：2004年度大阪大学接合科学研究所共同研究報告，24（2005）.
- 6) 坂村勝，大川正巳，大石郁，津村卓也，中田一博：溶接学会概要集，**79**，76（2006）.