論文

自動車ラジエータ用アルミニウム合金製クラッド材の 冷却水側の腐食挙動*

田中 宏和**, 池田 洋***

Cooling Waterside Corrosion Behavior of Aluminum Alloy Clad Sheets for Automotive Radiator*

Hirokazu Tanaka** and Hiroshi Ikeda***

The corrosion behavior of clad sheets made of aluminum alloys in automotive radiator coolants was studied for 99.7%Al, Al-1.0%Zn and Al-2.0%Zn alloys clad on the 3003 core alloy. The materials were subjected to elevating-temperature aqueous solution immersion tests and to electrochemical measurements in coolants with pH varying in the range of 7.5-10.0. Significant pitting corrosion with a black colored oxide film formation occurred on these clad sheets in the coolants at pH 9.5 and 10.0. For every clad sheet, the depth of the pitting corrosion exceeded the thickness of the sacrificial anode clad alloy and progressed to half of the tube thickness in 60 days. In the anodic polarization of the 3003, the steady-state current density was high and the pitting potential reached to more than 2000 mV vs SCE at pH 10.0, even though the open-circuit potential was between -1600 and -500 mV vs SCE. The polarization behavior of Al-1.0Zn was similar to that of the 3003. These results indicate the ineffectiveness of cathodic protection by cladding Al-1.0Zn as a sacrificial anode. Based on the experimental results, a corrosion mechanism for the clad sheet in a weakly alkaline solution was proposed related to the oxide film formation and the localized corrosion without the cathodic protection effect.

Keywords: automotive radiator, corrosion, alkaline solution, clad sheet, sacrificial anode

1. 緒 言

自動車用ラジエータのチューブには、アルミニウム 合金製クラッド材が広く使用されている。クラッド材 は3層構造になっており、心材は構造部材としての Al-Mn系合金、空気側層はフィンやヘッダプレートと の接合のための Al-Si系ろう合金、冷却水側層は冷却水 に対して心材を防食するための Al-Zn系犠牲陽極合金 となっている。

ラジエータの冷却水には、エチレングリコールと防 錆剤を含むロングライフクーラント(以下LLCと記載) を30~50 vol%に希釈した水溶液が使用されている。 LLCのpHは、冷却系の黄銅製、鋳鉄製、アルミニウム 合金製などの部品の防食を考慮し、中性から弱アルカ リ性に調整されている。一方、低緯度地域では凍結の 可能性がないため、冷却水に市水だけを使用する場合 があり、ラジエータの冷却水側は多様な環境にさらさ れる。

既往の文献によると、冷却水中のAl-Zn系犠牲陽極 合金の作用が有効でない結果が示されている^{1)~6)}。こ れらの多くは、ASTM合成水⁷⁾がベースの水溶液を用 いた場合や、冷温水サイクル試験の高温の保持時間比 率が高い場合に、犠牲陽極効果が作用しないことを示 唆している。また、弱アルカリ性のLLCを使用した場 合には、冷却水側層合金表面が黒変化するとともに、 耐食性が低下するとの報告もある⁸⁾。

* 本稿の主要部分は,軽金属,70(2020),268-273に掲載。

The main part of this paper has been published in Journal of The Japan Institute of Light Metals, **70** (2020), 268-273. ** (株) UACJ R&Dセンター 第一開発部

UACJ Technical Reports, Vol.7 (1) (2020) 37

Develop Department I, Research & Development Division, UACJ Corporation *** 元(株)UACJ Formerly, UACJ Corporation

弱アルカリLLC中の腐食機構に関しては,pH10.5の 水溶液中の調査結果が報告されているが⁹⁾,黒変化現 象には触れられておらず,耐食性におよぼす水溶液の pHや犠牲陽極合金の化学成分の影響については明らか にされていない。

そこで本研究では、中性から弱アルカリ冷却水環境 下におけるクラッド材の黒変化を伴う腐食挙動におよ ぼすpH,温度とクラッド材の化学成分の影響を調査し た。

2. 実験方法

2.1 供試材

クラッド材を構成する合金として、心材には3003、 冷却水側層には99.7%Al、Al-1.0%ZnとAl-2.0%Zn、空 気側層には4045を用いた。各合金の鋳塊を均質化処理 した後、心材の片面に冷却水側層合金を、一部の供試 材については他の片面に空気側層合金を所定のクラッ ド率になるよう組み合わせて熱間合わせ圧延した。さ らに、冷間圧延、焼鈍と冷間圧延の工程を経て厚さ 0.25 mmのクラッド材とした。なお、99.7%Alと3003 単層の板材も同様の条件で作製した。これらの板材を、 不活性雰囲気ろう付け炉を用いて868 Kで180 s加熱し 供試材とした。Table 1に供試材の化学成分、クラッ ド率と板厚を示す。

2.2 試験液

試験液には、LLCを純水で30 vol%に希釈し、さら にNaOHを添加することでpHを7.5,8.0,9.0,9.5と 10.0に調整した水溶液を用いた。LLCには、エチレン グリコール濃度が90 vol%以上で、防錆剤の主成分が リン酸塩である市販品 Autoin80を用いた。

2.3 浸せき試験

供試材を幅40 mm,長さ80 mmで切り出し,冷却水 側層面に幅30 mm,長さ70 mmの露出面を残して,切 断端面と空気側層面を絶縁テープとシリコーン樹脂で マスキングしたものを試験片とした。それぞれの水溶 液に試験片を全浸せきし、363 K、377 Kと388 Kの各 温度で3600 s間保持した後に取り出し、表面の変色程 度を観察した。また、それぞれの水溶液に試験片を全 浸せきし、361 Kで288×10² s、室温で576×10² s保 持するサイクルを最大60 回繰り返した。サイクル試験 後の試験片を乾燥後、幅10 mmと長さ20 mmの寸法で 切り出し、180度密着曲げ後、曲げ部表面をSEM観察 した。さらに、試験片をリン酸クロム酸中で煮沸して 生成物を除去した後、焦点深度法により腐食深さを測 定した。最大腐食部については、樹脂埋め研磨し、光 学顕微鏡により断面ミクロ組織を観察した。

2.4 電気化学的測定

供試材を幅15 mm,長さ80 mmで切り出し,冷却水 側層面に幅10 mm,長さ10 mmの測定面を残してシリ コーン樹脂でマスキングしたものを試験片とした。自 然電極電位については,室温で432×10² s,373 Kで 432×10² s保持するサイクルを3 回繰り返す間,3600 s ごとに測定した。分極曲線については,室温と361 K の水溶液中において,アルゴンガスで脱気しながら操 引速度50 mV/minの動電位法により測定した。分極測 定の前処理として,60℃の10%NaOH水溶液中で30 s 間浸せき後水洗し,続いて室温の30%HNO₃水溶液で 60 s間浸せき後水洗を施した。測定に用いた参照電極 は飽和カロメル電極である。

3. 結果

3.1 各種水溶液中の浸せき試験

Fig. 1にAl-1.0%Zn/3003クラッド材と3003単層材 を, pHが7.5, 8.0, 9.0と10.0の各水溶液中で3600 s浸 せきした後の表面の変色状態を示す。Al-1.0%Zn/3003 クラッド材の場合, pH7.5では冷却水側層である Al-1.0Znの表面は温度によらず金属光沢を呈してい

Specimen	Water side alloy				Core alloy				Air side alloy			
	Chemical composition (mass%)			Clad ratio	Chemical composition (mass%)				Chemical composition (mass%)		Clad ratio	Thickness (mm)
	Si	Fe	Zn	(70)	Si	Fe	Cu	Mn	Si	Fe	(%)	
99.7%A1/3003	0.05	0.15	-	20	0.2	0.5	0.15	1.2	-	-	-	0.25
Al-1.0%Zn/3003	0.15	0.35	1.0	20	0.2	0.5	0.15	1.2	-	-	_	0.25
Al-2.0%Zn/3003	0.15	0.23	2.0	20	0.2	0.5	0.15	1.2	10.0	0.3	10	0.25
99.7%Al	-	-	-	-	0.05	0.15	-	-	-	-	-	0.40
3003	_	_	_	_	0.2	0.5	0.15	1.2	_	-	_	0.30

 Table 1
 Composition of the specimens.

た。また、pH8.0と9.0では、表面は灰色から黒色の変 色を生じており、特にpH9.0で388 Kでの黒変化が顕著 であった。pH10.0では、表面は温度によらずエッチング されて自変化していた。また、3003単層の場合、pH7.5 ではAl-1.0%Zn/3003と同様に、表面は温度によらず金 属光沢を呈していた。pH8.0~10.0では、表面は灰色 から黒色の変色を生じており、pHと温度の上昇に伴い 黒変化が顕著になる傾向にあった。

3.2 各種水溶液中の温度サイクル浸せき試験

浸せき試験の結果から, Al-1.0%Zn/3003クラッド材 において黒変化を生じる腐食挙動を検討するための条 件は, 温度域が363 K程度, pHが8.0 ~ 10.0と考えら れる。試験温度が363 K程度の腐食試験方法としては, ラジエータの冷却水側試験として最も一般的な361 Kで 288×10² s,室温で576×10² s保持する条件が相当し ており,この方法を用いることにした。また,363 Kで 3600 sの浸せき試験後,pH9.0と10.0で,Al-1.0%Zn/3003 クラッド材にはすでに軽微な腐食が生じていたことか ら,pH9.0~10.0の水溶液中の腐食挙動を詳細に検討 するため,試験液のpHは7.5を比較として,7.5,9.0, 9.5と10.0の4条件とした。

Fig. 2に, 99.7%A1/3003, A1-1.0%Zn/3003と A1-2.0%Zn/3003クラッド材を各水溶液中で温度サイク ル浸せき試験(30サイクル)した後の外観を示す。試験 片端部の非変色部はマスキングの痕跡であり, 非変色 部に付着している白色残差はシリコーン樹脂である。

いずれの材料においても、pH7.5で表面は金属光沢を



Fig. 1 Surface discoloration of the water side alloys of (a) Al-1.0%Zn/3003 and (b) 3003 sheets after the immersion tests in 30 vol% LLC solutions for 3600 s.



1<u>0 mm</u>

Fig. 2 Appearance of the samples after the temperature cycling immersion tests in 30 vol% LLC solutions for 30 cycles.

呈しており、腐食痕は観察されなかった。XRD分析に より、表面にはベーマイトが生成していることを確認 した。99.7%Al/3003クラッド材の場合, pH9.0では, 冷却水側層の99.7%Al表面は黒変化していた。また、 pH9.5と10.0では、表面はエッチングされてそれぞれ灰 色と白色に変色しており,腐食痕が多数観察された。 Al-1.0%Zn/3003クラッド材の場合, pHが9.0では, Fig.1 の浸せき試験結果に対し黒変化がより顕著になってい た。またpH10.0では、Fig. 1で浸せき試験後に軽微な エッチングを生じていたのに対し, Fig. 2では, 30 サ イクル後(浸せき時間として8640×10² sに相当)に黒 変化しており、pH9.0と10.0ともに、浸せき時間の増加 に伴う皮膜の成長が認められた。pH9.5での黒変化も pH9.0や10.0と同程度であり、腐食痕はpH9.5とpH10.0 で顕著であった。Al-2.0%Zn/3003クラッド材の場合, Al-1.0%Zn/3003クラッド材と同様に、pH9.0~10.0で 明瞭な黒変化が生じており、pH9.5と10.0で腐食痕が顕 著であった。

黒変化と腐食痕が顕著であった条件の一つとして, pH10.0の温度サイクル浸せき試験(30サイクル)後の Al-2.0%Zn/3003クラッド材を用い,180度密着曲げし た後の表面をSEM観察した。Fig.3のSEM像におい て,冷却水側表面の皮膜厚さは5 µm以上に達しており, 一般的な水和酸化皮膜厚さの1 µm程度を大きく超えて いた。この皮膜をXRD分析したが,皮膜は非晶質であ った。高温水中で生じる非晶質の皮膜は擬似ベーマイ トとされており¹⁰⁾,また,皮膜の黒変化については, 皮膜成長過程でAl合金中のFeやSiなどの不純物元素



Fig. 3 SEM images of the surface of a bent Al-2.0%Zn/3003 sheet after the immersion test in 30 vol% LLC solution at pH10.0 for 30 cycles.(a) At low magnification and (b) at high magnification.

が皮膜中に取り込まれて生じるとの報告がある¹¹⁾。今回の浸せき試験で生じた黒変化も、同様の現象と考えられる。

Fig. 4に各水溶液中での温度サイクル浸せき試験60 サイクル後の最大腐食深さを,Fig. 5に最大腐食部の 断面ミクロ組織を示す。いずれの材料も,pH7.5での腐 食は軽微であった。99.7%Al/3003,Al-1.0%Zn/3003 と Al-2.0%Zn/3003クラッド材の場合,それぞれの最大腐 食深さはpHの上昇に伴い増大しており,特にpH9.5以 上でその傾向が顕著であった。pH9.5以上では,腐食は 孔食状に進展しており,腐食深さは犠牲陽極としての 冷却水側層合金厚さを超え,心材厚さの1/2程度に達 していた。一方,99.7%Al単層材の場合クラッド材と 同様に,腐食形態は孔食であり,腐食深さはpHの上昇 に伴い増大していた。クラッド材と99.7%Al単層材の 比較において,クラッド材の腐食径は単層材と同等か 小さくなっていた。さらに,クラッド材の腐食深さは 単層材の腐食深に対して同等か大きくなっていた。

3.3 各種水溶液中の自然電極電位

自然電極電位を室温と373 Kの温度サイクル下で測 定した。これは温度サイクル浸せき試験条件の温度範 囲である室温~361 Kを含み、より高温側の挙動も あわせて測定できるように、高温側を30 vol%LLC



Fig. 4 Maximum corrosion depth of the samples after the temperature cycling immersion tests in 30 vol% LLC solutions for 60 cycles.



Fig. 5 Cross section of the samples after the temperature cycling immersion test in 30 vol% LLC at pH10.0 for 60 cycles. (a) 99.7%Al/3003, (b) Al-1.0%Zn/3003, (c) Al-2.0%Zn/3003 and (d) 99.7%Al.

の沸点直下の373 Kにしたものである。Fig. 6に, 99.7%Al/3003, Al-1.0%Zn/3003とAl-2.0%Zn/3003クラ ッド材,並びに3003単層材をpH7.5とpH10.0水溶液中 で測定した自然電極電位を示す。クラッド材について は、いずれも冷却水側合金面で測定した結果である。 pH7.5の水溶液中の場合,室温での自然電極電位は1サ イクル目が-400から-1000 mVまでの範囲で単調に減 少,2サイクル目が-800 mV前後で安定,3サイクル目 が-400~-900 mVの間で大きく変動した。373 Kでの 自然電極電位は、1サイクル目が-1200 mV前後,2サ イクル目が-900 mV、3サイクル目が-800 mV前後で, サイクルが増えるに伴い貴化した。3サイクル目は -700~-1000 mVの間で大きく変動した。合金間で比 較した場合,Al-2.0%Znが最も貴で,Al-1.0%Znと3003 が卑な傾向にあった。

pH10.0の水溶液中の場合,室温での自然電極電位は, 1サイクル目が-1000 ~-1200 mVで推移したが,2サ イクル目以降は-500 mVと貴に変化した。373 Kでの



Fig. 6 Open-circuit potential of the samples during the temperature cycling immersion tests in 30 vol% LLC solutions at pH (a) 7.5 and (b) 10.0 for three cycles.

自然電極電位は,いずれのサイクルにおいても-1200 ~-1600 mVの間で推移した。合金間で比較した場合, 3003が最も貴で,99.7%Alが最も卑な傾向にあった。

3.4 各種水溶液中の分極曲線

Fig. 7に、Al-1.0%Zn/3003クラッド材と3003 単層材 を用いて、pH7.5とpH10.0それぞれの水溶液中で、室 温と361Kそれぞれに保持した条件で測定した分極曲線 を示す。クラッド材については、冷却水側合金面で測 定した結果である。Al-1.0%Zn/3003クラッド材と3003 単層材ともに,いずれの水溶液中においても孔食電位 は2000 mV以上と極めて貴であった。自然電位から電 位の変化に伴って電流密度が増加した後、電位の変化 に対し電流密度が概ね一定となる定常電流密度は, Al-1.0%Zn/3003クラッド材と3003単層材ともに、pH7.5 の室温と361 Kがそれぞれ数uA·cm⁻²と数十uA·cm⁻². pH10.0の室温と361 Kがそれぞれ数十µA·cm⁻²と数百 µA·cm⁻²であり、温度とpHの上昇に伴い増大してい た。361 KでpH10.0の水溶液中で測定された数百 µA·cm⁻²の定常電流密度は、中性の塩化物イオン水溶液 環境で測定される腐食電流密度の数µA·cm⁻²に対し¹²⁾,



Fig. 7 Polarization curves of (a) Al-1.0Zn/3003 and (b) 3003 sheets in 30 vol% LLC solutions at various pH values and temperatures.

相当大きい値であった。

高温の高pH水溶液中では,Fig.6に示した自然電極 電位がFig.7に示した孔食電位よりも1000 mV以上低 いことから,本来孔食が生じることはなく,全面腐食 が生じるはずである。しかし温度サイクル浸せき試験 において,Fig.5に示すとおり腐食は孔食状に進行して おり,電気化学的測定結果と一致しなかった。

4. 考察

4.1 各種水溶液中の腐食挙動

Fig. 4においてpH7.5では、冷却水側層合金の種類に よらず腐食はほとんど生じていなかった。これは、試 験中に生成したバリア性の高いベーマイト皮膜により 防食されたためである。LLCの防錆剤の主成分である リン酸塩が、ベーマイト皮膜の生成を促進したことも 影響していると考えられる。また、Fig. 7 (a)の Al-1.0%Zn/3003クラッド材の分極曲線において、pH7.5 の水溶液中の場合、室温での定常電流密度が数μA・cm⁻² と小さかったことからも、腐食速度が小さい環境であ ったと言える。361 Kでの定常電流密度は数十μA・cm⁻² と小さくはないが、ベーマイト皮膜が成長する途中段 階の値であり、ベーマイト皮膜が十分成長した後は、 腐食速度は低下すると考えられる。

一方,弱アルカリ環境のpH9.0以上,特にpH9.5以上 では、99.7%Al/3003、Al-1.0%Zn/3003とAl-2.0%Zn/3003 クラッド材の腐食深さは孔食状に著しく増大した。 pH10.0で361 Kの水溶液中は、Fig. 7(a)に示すとおり 分極挙動としては全面腐食を生じる環境であり、一方 で、Fig. 2に示すとおり擬似ベーマイトが生成する環境 でもある。すなわち、腐食初期には自然酸化皮膜が除 去され、表面が全面的に溶解しつつ、同時に擬似ベー マイト皮膜の成長が進行する。したがって腐食形態が 孔食状になったのは、擬似ベーマイト皮膜の成長とと もに全面腐食は抑制されるが¹³⁾、冷却水側層合金表面 に存在する金属間化合物上で擬似ベーマイト皮膜の成 長が阻害され、腐食が微小領域に局在化したためと考 えられる。

また、クラッド材の冷却水側層合金の99.7%Alや Al-Zn系合金の優先的な腐食が生じないままに、腐食 は心材厚さの1/2程度にまで達していた。さらに、ク ラッド材の腐食径が単層材と同等か小さくなっていた こと、クラッド材の腐食深さが単層材の腐食深さに対 して同等か大きくなっていたことから、クラッド材の 厚さ方向の腐食が単層材に対して抑制された形跡は認 められない。したがって、pH9.5以上の水溶液中におい ては,クラッド材の冷却水側層による犠牲陽極効果は 作用しないと考えられる。

4.2 弱アルカリ環境中の犠牲陽極効果

冷却水側の99.7%AlやAl-Zn系合金の犠牲陽極効果が 作用しなかったことに関し,犠牲陽極効果を期待でき る塩化物イオンを含む弱酸性水溶液中と比較して考察 する。Fig. 8に塩化物イオンを含む弱酸性水溶液中の 分極挙動¹²⁾をもとにした分極曲線の模式図を示す。 3003のアノード分極曲線と自然電極電位*Eacidic.*1の交点 の腐食電流密度*iacidic.*1に対し,Al-1.0%Znをクラッドし た場合の混成電位*Eacidic.*2における3003の腐食電流密度 *iacidic.*2は大幅に低減される。このように,心材合金の 3003に対し自然電極電位が卑な99.7%Al,Al-1.0%Zn, Al-2.0%Znなどの合金を冷却水側層にクラッドするこ とにより,混成電位が3003の自然電極電位より卑にな り,3003の腐食速度が大幅に低減される。同時に,冷 却水側層合金が優先的に腐食するため,腐食形態は孔 食にならず,全面腐食となる¹⁴⁾。

一方、pH10.0の弱アルカリ環境の分極挙動は、Fig. 7 (a) に示したとおり、塩化物イオンを含む弱酸性水溶液 中の分極挙動と大きく異なる。Fig. 8にFig. 7 (a) をも とにした分極曲線の模式図をあわせて示す。3003のア ノード分極曲線と自然電極電位 $E_{alkaline,1}$ の交点の腐食電 流密度 $i_{alkaline,1}$ と、Al-1.0%Znをクラッドした場合の混 成電位 $E_{alkaline,2}$ における3003の腐食電流密度 $i_{alkaline,2}$ の 差は小さい。したがって、心材合金の3003に99.7%Al, Al-1.0%Zn、Al-2.0%Znなどの合金を冷却水側層にクラ ッドしたとしても、3003の腐食速度が低減することは なく、腐食は冷却水側層、心材層に関係なく進行する と考えられる。





Fig. 8 Schematic diagram of the polarization curves in a weakly acidic solution containing chloride ions at 298 K and in a weakly alkaline LLC solution at 361 K.

貴な方から,3003,Al-1.0%Zn,Al-2.0%Zn,99.7%Al の順であり,3003は冷却水側合金により防食される自 然電極電位列になっている。しかし上述のとおり,弱 アルカリ水溶液中においては自然電極電位列をもとに した犠牲陽極効果の作用を期待できない。すなわち, 弱アルカリ水溶液中の腐食挙動に関して,冷却水側の 犠牲陽極合金の化学成分の影響は小さいと考えられる。

4.3 弱アルカリ環境中の腐食機構

以上の結果から,弱アルカリ水溶液中におけるクラ ッド材の腐食進行過程は**Fig.9**に示すとおりと考えら れる。腐食は一旦全面腐食状に進行し,溶出したアル ミン酸イオンAIO₂が(1)式のとおり水和することによ り擬似ベーマイトy-AIOOHが生成され,表面に沈着す ることで皮膜が形成される。

 $AlO_2^- + H_2O = AlOOH + OH^-$ (1)

擬似ベーマイトが沈着する過程で,FeやSiなどの不純 物元素を取り込むため皮膜は黒変化する。擬似ベーマ イト皮膜の成長とともに全面腐食は抑制されるが,擬 似ベーマイト皮膜の成長は冷却水側層合金表面に存在 する金属間化合物上などで阻害され,皮膜欠陥が生じ る。腐食が皮膜欠陥の微小領域に局在化するため,腐 食形態は孔食状になる。孔食は,腐食速度が高い高温 環境下において厚さ方向に早期に進行する。孔食が心 材合金に達した後,冷却水側合金により混成電位が卑 になったとしても、3003の腐食電流密度は低減しない ため,すなわち,冷却水側合金の犠牲陽極効果が作用 しないため,孔食は引き続き深さ方向に進行する。な お,孔食の進行に及ぼす金属間化合物の分散状態の影 響については未解明な点もあり,今後,詳細を検討す る予定である。

5. 結 言

中性から弱アルカリ冷却水環境下のクラッド材の腐 食挙動,並びに腐食挙動におよぼすpH,温度とクラッ ド材の冷却水側合金の化学成分の影響を浸せき試験と 電気化学的測定により調査した。

- (1) pH9.5以上の水溶液中で、黒色の皮膜生成を伴った孔食状の腐食が生じた。腐食深さは短期間で冷却水側層合金厚さを超え、心材厚さの1/2程度に達しており、冷却水側層にクラッドした99.7%Al、Al-1.0%ZnとAl-2.0%Zn合金の犠牲陽極効果は作用していなかった。
- (2)腐食形態が孔食状になったのは、腐食が全面腐 食状に進行しつつ同時に擬似ベーマイト皮膜の 成長が進行する過程で、冷却水側層合金表面に 存在する金属間化合物上で皮膜成長が阻害され 皮膜欠陥が生じ、皮膜欠陥の微小領域に腐食が 局在化したためと考えられる。
- (3) 犠牲陽極効果が作用しなかったのは、心材である3003にAl-1.0%Zn合金をクラッドし、混成電位を3003の自然電極電位より低い値に制御したとしても、Al-1.0%Zn合金をクラッドした3003の腐食電流密度が3003単層の腐食電流密度に対して低減しないためと考えられる。



Fig. 9 Schematic illustrations of the corrosion processes of the clad sheet in a weakly alkaline solution. (a) Initial state prior to the corrosion, (b) initiation of the localized corrosion and (c) growth of the localized corrosion.

参考文献

- 1) 池田洋:住友軽金属技報, 21 (1980), 101-108.
- 2) R. C. Dorward: SAE Technical Paper 780302, (1978).
- A. Gray and A. Howells: SAE Technical Paper 940499, (1994), doi.org/10.4271/940499.
- 4) 川瀬寛:古河電工時報, 75 (1985), 215-222.
- Y. Ando, I. Nita, M. Uramoto, H. Ochiai and T. Fujiyoshi: SAE Technical Paper 870180, (1987).
- 6) 伊東章郎, 岩井克夫, 長良敏夫, 宮木美光, 藤本日出夫, 瀧川淳: 軽金属, 44 (1994), 246-252.
- 7) ASTM D1384-1387.
- 8) 池田洋:住友軽金属技報, 41 (2000), 134-146.
- 江戸正和, 黒田周, 渡辺晶, 当摩健: 軽金属, 53 (2003), 55-60.
- 10) 山崎良夫, 播本寬光:金属表面技術, 16 (1965), 250-254.
- 11) 阿部隆,相沢浩司,内山利光,礒山永三:軽金属, 24 (1974), 254-262.
- 12) 大谷良行, 兒島洋一: 軽金属, 62 (2012), 244-248.
- 13) 池野尚志, 横山靖正: 軽金属, 12 (1962), 236-242.
- 14) 加藤建志,池田洋:住友軽金属技報,37(1996),112-119.



田中 宏和 (Hirokazu Tanaka) (株) UACJ R&D センター 第一開発部