

AKROSEと拡散接合のハイブリッド接合技術「AKROSE HYBRID」の開発



山本 浩二
Koji Yamamoto
ファスナー事業部



近藤 健太郎
Kentaro Kondo
ファスナー事業部

1. はじめに

自動車業界をはじめとする各業界で、部品のマルチマテリアル化による軽量化や高機能化が注目されている。そのような状況の中、当事業部では、2018年に冷間圧造技術により異なる金属同士を強固に密着させる異種金属接合技術AKROSE（アクローズ）¹⁾を開発し、現在は同技術を適用した部品を量産している。

異種金属接合の中でも、とりわけ銅とアルミニウムの接合は、バッテリー部品のような高い導電性が求められる部品分野でニーズが高まっている。加えて、接合部における長期信頼性を保証するために、接合部を強固に一体化させる金属結合によって接合することが求められている。このような要求に応えるべく、AKROSEによる機械的接合に冶金的接合である拡散接合²⁾を加えることにより、原子レベルの接合を実現した接合技術「AKROSE HYBRID」を開発したので、本報において紹介する。

2. AKROSE HYBRID の概要

本技術は、AKROSEによって接合した部品を熱処理することにより、接合界面の密着性を原子レベルにまで向上させるものである。

2.1 従来技術の課題

AKROSEの接合界面は、従来の機械的接合では得ることができない高い密着性を持つが、原子レベルの接合には至っていない。一方、溶接など、冶金的手法で接合部を一体化する冶金的接合では、高い密着性が得られるものの、材料の組合せ次第では接合できないことや、接合界面に生成される脆弱な金属間化合物が接合強度を不安定にするという欠点がある。また、一般的な拡散接合においては、材料表面の微細な粗さや酸化皮膜が接合を阻害する要因となる。加えて、部材同士を原子的な距離まで近づけて、加圧した状態で加熱しなければならないため、専用の装置や治具が必要となり、複雑な形状の部品は量産が困難とされる。

2.2 接合メカニズム

AKROSEに拡散接合を加えることにより、前述のような課題を解決する。図-1は銅とアルミニウムにおけるAKROSE HYBRIDのメカニズムを示す。接合前の金属表面には酸化皮膜が存在し、これが拡散接合の阻害要因となる（図-1 (a)）。AKROSEでは、部材同士が塑性変形をともなって密着しながら接合されるため、この接合過程において酸化皮膜が破壊され、新生面同士が密着する（図-1 (b)）。このようにAKROSEの接合界面では新生面同士が強く密着しているため、拡散接合に必要な加圧状態を得ることができている。この状態で双方の材料に適した処理条件で熱処理を行うと、新生面同士の密着部で金属原子の相互拡散が起こる（図-1 (c)）。

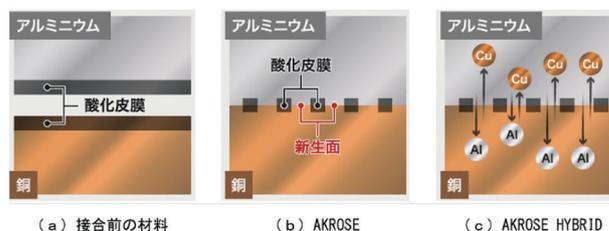


図-1 AKROSE HYBRIDの接合メカニズム

3. 接合実験

前述したように、AKROSE HYBRIDには接合部における高い導電性と長期信頼性を保証するため、原子レベルでの接合が求められている。そこで本実験では、バッテリー部品分野でニーズの高い銅部材とアルミニウム部材とを接合した接合部品について、熱処理温度の違いによる金属結合状態、および導電性の観察・評価を実施した。なお、市場に流通する実製品においては、接合部だけでなく、暴露部の耐食性も求められることを想定し、銅部材には、あらかじめニッケルめっき処理を施した。対象部品の接合部断面を図-2に示す。



図-2 接合部断面

3.1 熱処理条件

JISにおける拡散接合の熱処理温度は、母材の融点以下と定義されている³⁾。そのため、低融点側金属となるアルミニウム融点660℃のおよそ30%から80%を範囲とする、200℃、300℃、400℃、500℃を本実験の熱処理温度に設定した。また、加熱時間は各温度共に4時間とした。

3.2 実験結果

各熱処理温度で熱処理を行った接合部品について、接合界面の元素分析、および接合部品の電気抵抗値測定を実施した。元素分析には日本電子(株)製分析走査電子顕微鏡 JSM-6010PLUS/LAに搭載されたエネルギー分散型X線分光器(以下、EDSという)を使用した。また、電気抵抗値測定には日置電機(株)製抵抗計RM3548を使用した。

3.2.1 接合部断面の元素分析

各熱処理温度の接合部品における接合部断面のEDS元素マッピングを図-3に示す。分析倍率300倍でアルミニウム、ニッケル、銅の3種類の元素をそれぞれRGB(赤緑青)で重ねて表示している。

AKROSEの接合過程において、酸化皮膜が破壊されるため、ニッケルめっきも同様に破壊されて断裂していることが確認できる。このニッケルめっきの断裂部(以下、Ni断裂部という)で銅とアルミニウムが直接接触することになる。500℃熱処理品では、Ni断裂部で銅がアルミニウムに拡散している。また、分析倍率を2,500倍まで拡大(図-4)すると、400℃熱処理品でも同様に拡散しているが、300℃では明確な拡散は起こっていない。したがって、高温で熱処理するほど拡散が進行するといえる。

3.2.2 分解後部材の元素分析

各熱処理温度の接合部品を引き抜き分解したアルミニウム部材、銅部材の接合界面だった面におけるEDSマッピングを、図-5および図-6に示す。前述同様に分析倍率300倍でアルミニウム、ニッケル、銅をRGBで重ねて表示している。

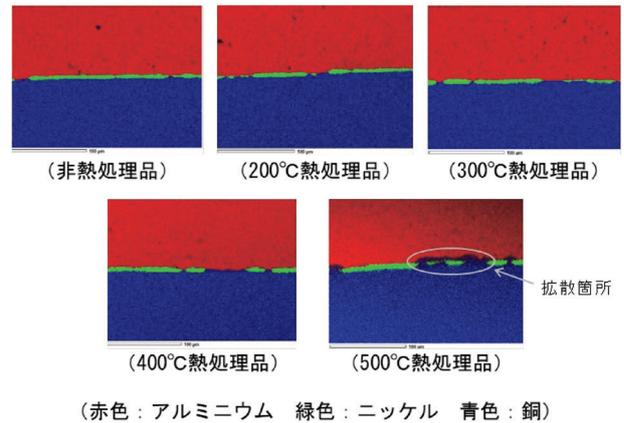


図-3 接合部断面のEDSマッピング (倍率300倍)

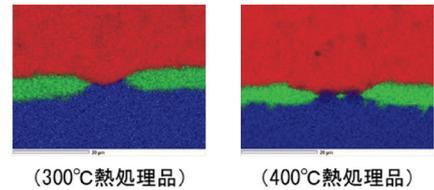


図-4 接合部断面のEDSマッピング (倍率2,500倍)

アルミニウム部材側においては、非熱処理品と200℃熱処理品ではアルミニウムの分布が大半を占めている。300℃以上の熱処理品では銅が分布し、高温になるに連れて増加していることが確認できる。表-1は図-5に示した領域の定量分析結果であり、200℃熱処理品では任意箇所を、300℃以上の熱処理品では銅の分布箇所をそれぞれ分析している。銅の分布がない200℃熱処理品ではCu(銅)は検出されない。300℃熱処理品ではCuが5wt%程度含まれており、400℃と500℃の熱処理品では30wt%を越えるまでに増加している。また、全ての熱処理温度においてNi(ニッケル)が検出されていないことから、Ni断裂部で起こる銅とアルミニウムの拡散であると考えられる。

一方、銅部材側では、非熱処理品を含む全ての熱処理温度において、Ni断裂部でアルミニウムが分布している。表-2は図-6に示したNi断裂部の定量分析結果である。200℃と300℃の熱処理品ではCuの検出量は僅かであり、Al(アルミニウム)が大半を占めている。これは、AKROSEにより銅部材表面の微細な凹凸にアルミニウム部材が入り込む、いわゆるアンカー効果の状態となり、引き抜き分解時にアルミニウムが銅部材側に引っ掛かって引き剥がされたことによ

るものと思われる。400℃を越えるとCuの割合が急増する。400℃熱処理品ではおよそ15wt%、500℃熱処理品ではおよそ40wt%にまで増加することから、銅とアルミニウムの拡散であると考えられる。

また、ニッケルめっきが断裂していない箇所（以下、Ni連続部という）において、500℃熱処理品ではニッケルの分布が減少し、銅とアルミニウムが混在して分布している。表-3は図-6に示したNi連続部の定量分析結果である。400℃以下の熱処理品では、Cuは検出されずAlも僅かであり、Niが大半を占めることから、明確な拡散は起こっていない。しかし、500℃熱処理品ではNiの割合が30wt%程度にまで減少し、Cuが10wt%程度、Alが45wt%程度含まれることから、銅とニッケルとアルミニウムの拡散が生じていると考えられる。

元素分析により、熱処理温度が300℃を越えると拡散が起こり、高温になるに連れて拡散が進行して、顕著に金属間化合物層が形成されることが確認できた。また、Ni断裂部で起こる銅とアルミニウムの拡散だけでなく、Ni連続部においても、銅とニッケルとアルミニウムの拡散が起こっていることがわかった。

3.2.3 接合部品の電気抵抗

各熱処理温度の接合部品における電気抵抗値の測定結果を図-7に示す。非熱処理品と比較すると、200℃熱処理品ではほぼ変化していないが、300℃を越えると低下することが確認できる。非熱処理品の電気抵抗値を基準（100%）とした場合、300℃熱処理品の電気抵抗値は92%に低下し、400℃熱処理品では88%、500℃熱処理品では87%にまで低下している。これには接触抵抗の低下が影響していると思われる。

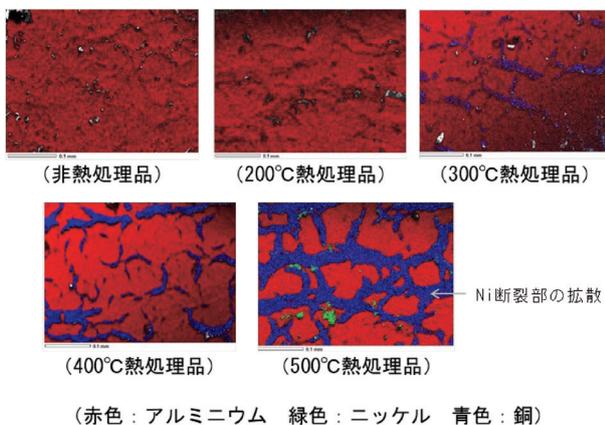


図-5 分解後アルミニウム部材表面のEDSマッピング (倍率300倍)

表-1 分解後アルミニウム部材表面の定量分析

熱処理温度	200℃	300℃	400℃	500℃	
(wt%)	Cu	0.00	5.17	31.54	36.17
	Ni	0.00	0.00	0.00	0.00
	Al	98.00	65.59	61.39	44.44
	C	0.00	26.63	7.07	19.39
	O	0.00	1.58	0.00	0.00
	他	2.00	1.03	0.00	0.00

表-2 分解後銅部材表面のNi断裂部における定量分析

熱処理温度	200℃	300℃	400℃	500℃	
(wt%)	Cu	0.83	2.32	14.84	39.36
	Ni	1.00	1.03	0.00	0.00
	Al	89.31	92.26	75.84	46.70
	C	8.49	3.27	8.37	13.02
	O	0.00	0.00	0.95	0.92
	他	0.37	1.12	0.00	0.00

表-3 分解後銅部材表面のNi連続部における定量分析

熱処理温度	200℃	300℃	400℃	500℃	
(wt%)	Cu	0.00	0.00	0.00	11.34
	Ni	82.03	94.18	90.39	32.59
	Al	0.62	0.83	0.84	46.75
	C	17.35	4.99	8.77	9.32
	O	0.00	0.00	0.00	0.00
	他	0.00	0.00	0.00	0.00

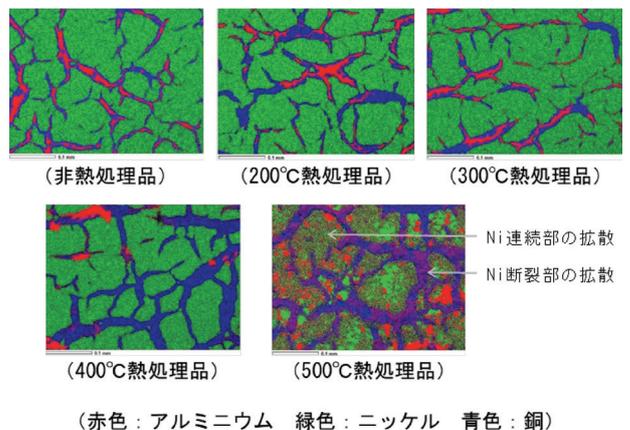


図-6 分解後銅部材表面のEDSマッピング (倍率300倍)

導体同士の接合部分には、接触抵抗といわれる電気抵抗が発生し、この抵抗は、集中抵抗と皮膜抵抗とから成るとされている⁴⁾。部材同士の接触面は、全体が均一に接触することはなく、金属表面の微細な粗さが影響することにより、全体の極僅かな部分が真の接触面となる。集中抵抗とは、この狭い真の接触面に電流が集中することで生じる抵抗であり、密着度合を高めて接触面積を増やすことにより、集中抵抗を下げるることができる。

前述のように、熱処理温度が300℃を越えると拡散が進行する。ゆえに、部材同士が原子的な距離に近づくまでに密着度合が高められ、接触抵抗が低下したことが電気抵抗を下げる要因になったと考えられる。また、皮膜抵抗は金属表面の酸化や硫化による汚染皮膜に起因する抵抗であり、汚染皮膜が少ないほど皮膜抵抗を下げるができる。本技術の接合界面は、酸化皮膜を破壊して新生面同士が密着しているため、使用環境などの外乱による汚染皮膜の発生を防ぐことができる。このように、本技術の接合構造においては、高い導電性を長期的に安定して得ることが期待できると考える。

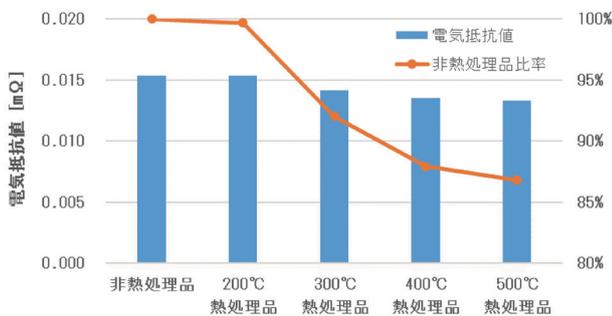


図-7 熱処理温度における接合部品の電気抵抗

4. AKROSE HYBRID の特長

ハイブリッド接合により、従来の拡散接合の抱える欠点を補うことができる。例えば、拡散接合では接合界面に生じる脆弱な金属間化合物層によって十分な接合強度が得られないが、AKROSE HYBRIDでは、AKROSEによる物理的な引っ掛かり構造から成る機械的接合構造によって金属間化合物層の脆性を補い、接合界面における高い密着性と接合強度とを両立することが可能となる。

また、拡散接合では、部材同士を原子的な距離まで近づけて密着させ加圧するために、専用の装置や治具

が必要であるが、AKROSE接合部品は、接合段階で新生面同士が強く密着しているため、これらが不要となる。ゆえに、接合部品を熱処理するだけで拡散接合が可能となり、大量生産も容易となる。加えて、AKROSEの接合界面は酸化皮膜を破壊して密着しているため、一般的に困難とされる純アルミニウムの拡散接合も可能となる。

5. おわりに

AKROSE接合部品の密着性を原子レベルにまで向上させるため、拡散接合とのハイブリッド接合を試みた。ニッケルめっき処理した銅部材とアルミニウム部材のAKROSE接合部品を対象に実験した結果、接合界面に金属間化合物層が形成され、金属結合による接合が可能であることを確認した。また、接合界面の金属原子の拡散が進行して密着度合が強化されることで、導電性が向上することも確認できた。さらに、熱処理の時間を固定して温度を変化させた条件においては、高温で熱処理するほど拡散が進行し、顕著に金属間化合物層が成長することを確認した。

金属間化合物を形成する接合においては、熱処理の温度と時間が重要な要素となる。本実験において、熱処理温度の検証ができたため、今後は、熱処理時間について検証することにより、本技術における最適な熱処理条件の確立に繋げていきたい。

また、本技術を開発したことにより、接合する材料や形状、金属結合の要否など、自由な発想で接合部品を量産することができるため、多様化するニーズに応え、新市場を切り拓く基幹技術としていきたい。

〈参考文献〉

- 1) 山本浩二, 手島政和「冷間圧造技術を活かした異種金属接合技術「AKROSE」の開発」日東テクニカルレポート, No.79, 2019.7, p.11-14
- 2) 大橋修「拡散接合 その1 - 拡散接合の現状と拡散接合の実用例 -」まてりあ, 第57巻 第9号, 2018.9, p.443-447
- 3) 日本工業規格, 溶接用語 - 第2部: 溶接方法, JIS Z 3001-2 (2018) .
- 4) 玉井輝雄「電気接触現象」エレクトロニクス実装学会誌, Vol.3 No.3, 2000.5, p.256-262