

電食防止を指向した固相接合技術の開発

—電磁圧接による異種金属接合—

千葉大学 機械工学科

准教授 糸井 貴臣

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014008)

キーワード：電磁圧接，異種金属接合，めっき層，電食

1. はじめに

近年、地球温暖化を防ぐために様々な分野で Co₂ 排出制限の取り組みが試みられており、その中でもエンジンとモーターを組み合わせたハイブリッド車は大きく貢献すると考えられる。¹⁾ これらの車両では電力調整のために複数のリチウムイオン電池のユニットを構成して使用する際に Al と Cu の異種金属の接続が必要となるが、この接合においては、接合界面での金属間化合物生成の生成に起因する脆化や接合後の異種金属接触腐食（電食）が問題となる。これらの懸念に対して、異種金属間の接合においては機械的接合法や固相接合を適応したり、接触部分を樹脂でシールドする等の対策が施されている。²⁾

電磁圧接は電磁力により生じる衝撃力を利用した固相接合法であり、同種または異種金属同士の強固な接合が可能である。³⁾ 電磁圧接では、板の表面近傍の塑性変形により接合が達成できるという特徴を有している。従って、予めめっき等の防食処理を施した板同士について、めっき層を破壊することなく接合できる可能性がある。この事は異種金属接合において、同種のめっき層を施した場合、接合界面を同種接合とする事が可能な事を意味しており、接合界面での金属間化合物生成を抑制すると共に、接合後の異種金属接触腐食も抑制できる可能性を示唆する。

そこで本研究では、Ni めっきを施した Al 板および Cu 板について、めっき厚さを変化させて電磁圧接を行い、接合の可否、接合強度および接合部へのめっき層の影響を調べると共に、作製した接合板の腐食特性について調査することを目的とする。

2. 実験方法

図 1 に電磁圧接装置の断面模式図を示す。本実験では E 字形平板状ワニタンコイルを用いた。間隙 1.0mm を設けてコイルの上面に試料を配置する。電磁圧接ではコイルに大電流を流すことで可動板（下側）に上向きに電磁力が発生し、高速度で変形し、固定板（上側）に衝突してシーム状に接合される。

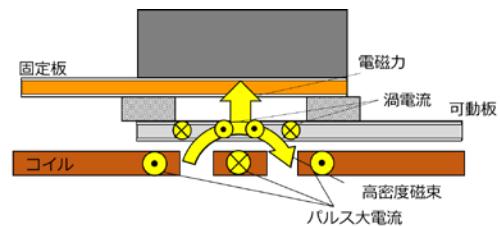


図 1 電磁圧接装置の断面模式図

供試材には Cu 板として C1100P-1/4H、板厚 0.6mm、Al 板として A1050P-H24、板厚 1.0mm を用い、Ni めっき (2, 10, または 20 μ m) は電解めっき法により付与した。以降 Ni めっきを付与したものを Al(Ni)と表記し、めっき厚さを Ni2 のように表記する。パルス大電流の電源にはコンデンサを用い、容量は C=100 μ F で一定とした。コンデンサに蓄えられるエネルギーは放電エネルギー W [kJ]と呼び、これを変化させて接合実験を行った。供試材の組み合わせは Al(Ni)/Cu(Ni)Ni₂-2 μ m(以降 Ni-4 と表記)と Ni₁₀-20 μ m(以降 Ni-30 と表記)とした。これらの供試材で W を変化させ接合板を作製した。作製した接合板の外観写真を図 2 に示す。得られた接合板のシーム方向と垂直の断面に対し SEM, EDS を用いて接合界面の観察を行った。接合長さの測定は、中央非接合部および外側の非接合部において、SEM で観測できる亀裂の先端をそれぞれ接合開始点、接合終了点とし、

その距離を接合長さとして測定を行った。接合強度の評価は接合板を JIS13B 号(1/2 縮小)形状に切り出し、引張せん断試験により行った。図 3 に試験片および試験後の外観写真を示す。図に示すように、接合部はく離れたものではなく、母材 (A1050PH24) で破断した状態を良好な接合状態と判断した。作製した接合板の耐食性を調べるために塩水噴霧試験を行った。試験条件は中性塩水噴霧 35 度, pH6.5~7.2, 塩水濃度 50g/l で行い試験時間は 96 時間とした。試験片は接合板を 20×80mm に切り出し、切断面にシールを施した後に試験を行った。試験後に SEM 観察を行い、腐食状態を調べた。

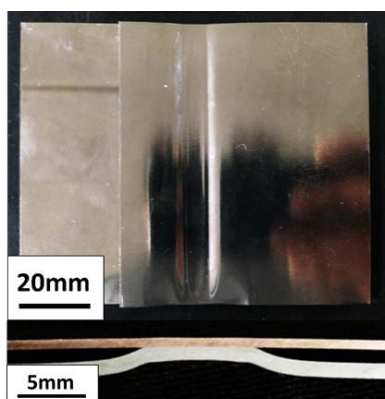


図 2 接合板の外観写真

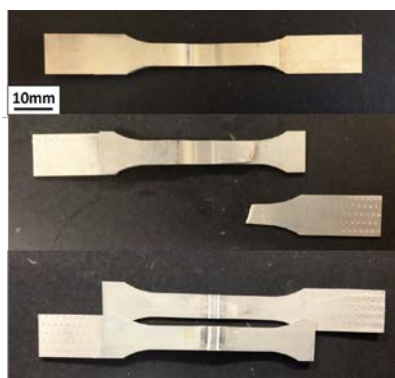


図 3 試験片および試験後の外観写真

3. 実験結果

図 4 に Ni2 および Ni20 の SEM 像を示す。黒枠の拡大像から、それぞれのめっき層の結晶粒径が異なることがわかる。Ni2 においては、 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 程度の柱状粒で、また Ni20 においては、 $10\sim 100\text{nm}$ の粒状の Ni 結晶で構成されていた。Ni20 においても同様の微細な粒状結晶であった。硬さ値は Ni2 で $230\sim 290\text{HV}$ 、また Ni10

と Ni20 では $530\sim 580\text{HV}$ であり、微細な結晶からなる Ni2 と比較すると Ni10 や Ni20 の硬さ値が高かった。

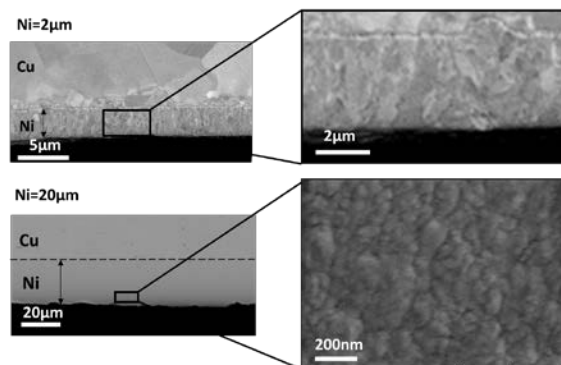


図 4 めっき層の SEM 像

引張せん断試験による破断荷重と接合板を作製した W との関係を図 5 に示す。各 W で作製した接合板について 3 回ずつ引張せん断試験を行い、その平均値を棒グラフで示した。また、図中には Al 板の破断荷重 (790N) を実線で示す。界面はく離れた試料については白抜きで、また母材 (Al 板) 破断した試料は黒塗りでその破断荷重を示す。 $W=0.8\text{kJ}$ の場合は 753N で界面はく離れたが、 $W=0.9\sim 2.0\text{kJ}$ では、Al 板で母材破断した。一方、めっきを施した試料では、Ni-4 接合板については $W=0.9\text{kJ}$ 以上で、また、Ni-30 接合板については $W=1.1\text{kJ}$ 以上で母材破断した。上記のように、めっき層は Al 板や Cu 板と比較して硬さ値も高いことから、接合に必要な W も高くなったといえる。以上の結果から、めっき厚さの異なる板において、電磁圧接により Al(Ni)/Cu(Ni)接合板の作製が可能であり、母材破断となる強固な接合が可能であった。

図 6 に接合板の断面 SEM 像を示す。上側が固定板 (Cu 板) で下側が可動板 (Al 板) である。電磁圧接では、可動板が固定板に衝突後、コイルの中心から接合端部側に向けて接合が進行する。爆発圧着と同様に衝突点の移動速度と固定板と可動板との衝突角度が波状界面接合の条件を満たすようになる部分で接合が行われる。⁴⁾ 従って、コイルの中心に対してほぼ対称に、図中に黒枠で囲った部分の左右の 2 箇所線状に接合される。図中に接合部の左側、また中心付近の拡大像を示す。中心付近では Al 板と Cu 板の間に約 $10\mu\text{m}$ 程度の隙間が存在し未接合であるのに対し、左側ではめっき同士が直接接触している様子がわかる。以後、この左右 2 か所を接合部と

呼び、これらの幅の合計を接合幅とする。

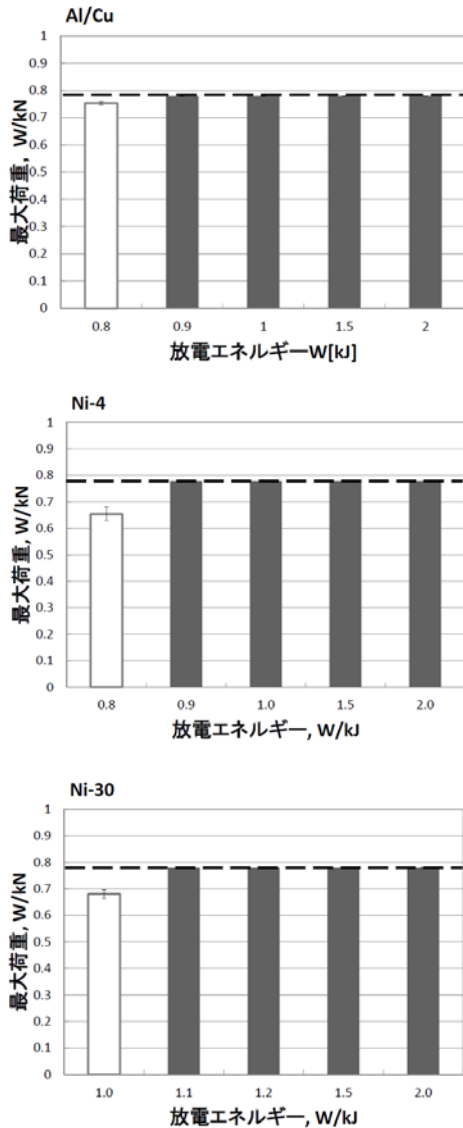


図5 引張せん断試験による破断荷重と接合板を作製した W との関係

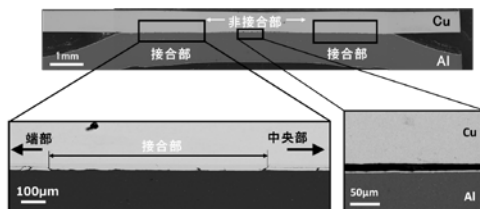


図6 接合板の断面 SEM 像

図7に各 W で作製した接合板の接合幅を測定した結果を示す。◇が中心部より左側、□が右側の接合幅を示し、●が左右の接合幅の合計を示す。これらの図より、いずれの W においても左右の接合幅がほぼ同じであることや、 W が上昇するにつれて、接合幅が増加することがわかる。接合幅が広くなるに従い、接合強度が高くなり、より安定な接合状態となる事を意味していると考えられる。

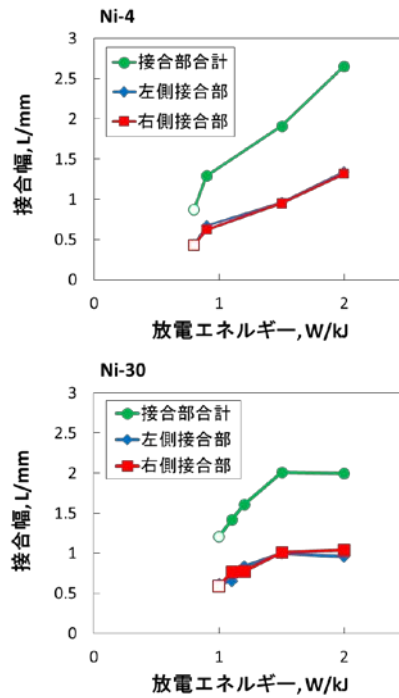


図7 接合幅と接合板を作製した W との関係

図8に Ni-4 と Ni-30 接合板の界面について SEM 観察を行い EDS による元素分析を行った結果を示す。観察位置は接合幅内のほぼ中心部である。観察結果には Al/Cu 接合板の界面組織を比較として示す。

Al/Cu の接合界面からは、部分的にはあるが、Al と Cu からなる金属間化合物が生成していることがわかる。一方、Ni-4 接合板の接合界面からは、衝撃波の伝播に伴う波状模様が観察され、Al と Cu は直接接することなく、めっき層を介して接合している事がわかる。また、接合界面において硬さ試験を行ったところ、めっき層は接合前と比較して硬さ値が高く、加工硬化していた。Ni-30 接合板においては、めっき層が比較的厚く、硬さ値も高いために、Ni-4 接合板と比較すると波状模様の波

長や振幅は小さいものの、同様にめっき層同士が接合していた。いずれの接合界面からも酸化物の存在は確認できず、金属ジェットとして排出されたものと考えられる。電磁圧接では、間隙長が同じ場合、 W の増加は衝突速度の増加に繋がり、衝突速度の増加は直接的に衝突圧力を増加させる。従って、 W の増加に伴い接合幅が広がったように、その接合界面組織も影響をうける。また、電磁圧接では、可動板が固定板に衝突して衝突点が高速度で移動する際、衝突角度が連続的に変化するため波長と振幅は連続的に変化することから、接合終了点では、接合開始点と比較して、波長が大きくなる傾向がある。

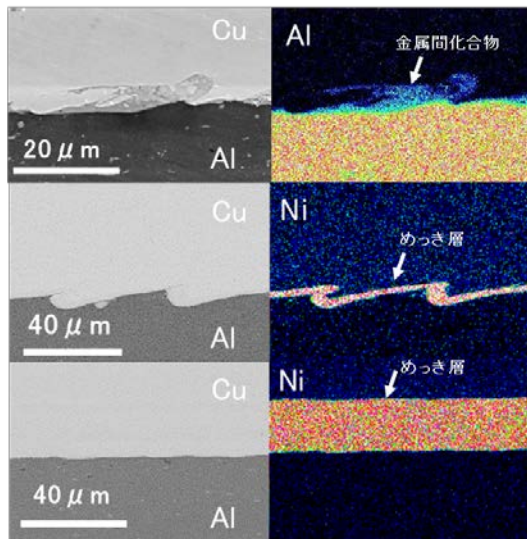


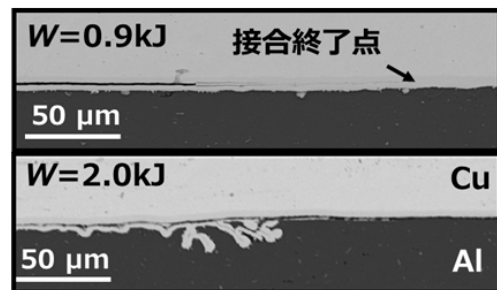
図8 接合界面の断面 SEM 観察結果。同視野で調べた EDS マップを合わせて示す。

そこで Ni-4 および Ni-30 接合板について、SEM にて W の増加による接合終了点の組織変化を調べた結果を図9に示す。いずれの試料においても、図5で示すように母材破断する強固な接合が達成できた接合条件である。Ni-30 接合板については、 $W=1.1\text{kJ}$ および 2.0kJ においても接合終了点においてめっき層同士が接合していることがわかる。一方、Ni-4 接合板については、 $W=0.9\text{kJ}$ においては接合終了点においてめっき層に変化はないが、 $W=2.0\text{kJ}$ においては、可動板のめっき層が部分的にはく離している様子が伺える。接合終了点では開始点と比較して接合角度が大きいため波長や振幅が大きくなり、接合界面での塑性変形量が多くなった

め、めっき層の厚さが比較的薄く、かつ W が高い場合、めっき層ははく離しやすくなる傾向があると考えられる。電磁圧接による板の重ね接合においては、接合終了点がめっき層同士で接合される事が同種接合となるために重要である事から、めっき層が薄い場合、比較的低い W で接合する事が望ましいと言える。

以上の結果から、めっき層の厚さを変えて Al(Ni)/Cu(Ni)接合板を作製した結果、めっき層を破壊することなく、強固な接合が達成できた。① W の増加により接合幅が増加する事、② 金属ジェットの排出により接合界面の酸化物が除去され、化合物を形成することなく、めっき層の新生面同士での接合ができた事、③ 接合界面が加工硬化し、強化された事、が強固な接合が達成できた組織的な要因であると考えられる。

N-4



Ni-30



図9 W の増加による接合終了点の組織変化

最後に Ni-4 接合板 ($W=2.0\text{kJ}$) について、塩水噴霧試験を行った。96 時間の塩水噴霧試験後に SEM 観察を行った結果を図10に示す。試験はめっきを施していない Al/Cu 板についても同様に行った。Al/Cu 接合板の断面 SEM 像および EDS 分析結果、試験前の組織と比較すると、Al 側の SEM 像中に白枠で囲った部分に幅 0.5mm 、厚さ $100\mu\text{m}$ 程度の黒いコントラストが観察され、EDS

マップからは酸素が多く含まれている事がわかる。これは、継ぎ手の接合部に塩水が入り込み、電気化学的にCuよりも卑なAlが孔食を生じることで水酸化アルミニウム (Al(OH)₃) を形成したと考えられる。一方、Ni-4 接合板では、試験後も試験前と変化することなくめっき層が残っており、Al/Cu の状態と比較して電食を生じた様子は伺えない。これは、実際に外気に（噴霧された塩水）に触れる接合部位がめっき層同士の接合がなされているためであると考えられる。

参考文献

- 1) www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment/tk_000007.html. 国土交通省 HP.
- 2) 崎山達也, 村山元, 内藤恭章, 才田健二, 宮崎康信, 及川初彦, 野瀬哲郎: 新日鉄技報, 393 (2012), 91-98.
- 3) 相沢友勝: 塑性と加工, 44-512 (2003), 957-959.
- 4) 日本塑性加工学会編: 接合—技術と全容の可能性—, コロナ社 (1990).

謝辞

本研究は天田財団一般研究開発助成 (AF-2014008) の支援を受けて行われたものである。付記して感謝申し上げます。

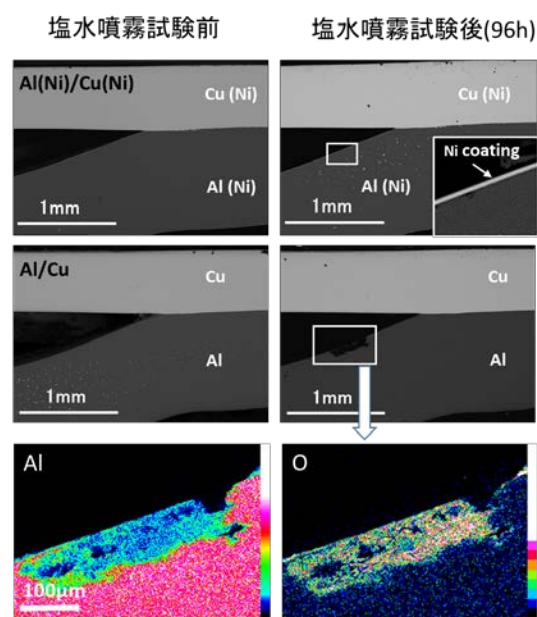


図 10 接合板の塩水噴霧試験後の SEM 観察結果。
図中の白線で囲った領域の EDS マップを合わせて示す。

4. まとめ

電磁圧接により Al(Ni)/Cu(Ni)の接合について、めっき厚さの異なる試料を接合した結果、めっきの厚さによらず、強固な接合が可能であった。接合時にめっき層が破壊することなく、金属間化合物の形成もなく、表面近傍の塑性変形によりめっき層同士の同種接合が達成された。異種金属接合において接合部位はめっき層による同種接合であり、耐食性にも優れることがわかった。