

ユーザーベネフィット

- ◆ X線CTで組成や内部構造の変化を非破壊で捉えることができ、接合条件の検討などの研究に役立ちます。
- ◆ 接合強度に寄与する金属間化合物層の膜厚や内部構造の解析に関する研究に役立ちます。

■はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向け、輸送機の軽量化が進められています。摩擦攪拌接合（FSW: Friction Stir Welding）及び摩擦攪拌点接合（FSSW: Friction Stir Spot Welding）は、ツールの回転による摩擦熱を用いて異種材料を固相接合する方法で、自動車産業分野ではエンジンクレードル、サスペンションアーム、フロントサブフレームなどに適用されています。自動車だけでなく鉄道車両、航空機、船舶、土木構造物、電気機器など様々な分野において軽量化の目的で幅広く利用され、接合プロセスの最適化や接合部・界面の組織制御などの研究が進められています。

今回、電子線マイクロアナライザEPMA™（EPMA-8050G）を使用した摩擦攪拌点接合による異種接合部の分析例をマイクロフォーカスX線CTシステム（inspeXio SMX-225CT FPD HR Plus）の結果と併せてご紹介します。

■摩擦攪拌点接合（FSSW）

アルミニウム合金とめっき鋼板をFSSWする場合は、プローブとショルダーで構成されたツールをアルミニウム合金に押し付けて、攪拌時の摩擦抵抗に伴う発熱により、アルミニウム合金と鋼板のめっきを軟化します。その際、接合界面のめっきが排出されると共に鋼板表面に新生面が現れて、金属間化合物層が形成されて接合します。FSSW継手は、中心にボタン状の穴を持ち、穴の全周で接合部が形成され、ショルダーの外側にバリ状のはみ出し部が生じます。

今回、2種類の接合条件（加圧時間：short、long）で、アルミニウム合金（A6061）とGA鋼板（高張力鋼+合金化溶融亜鉛めっき）をFSSWにより試料作成しました。（図1）

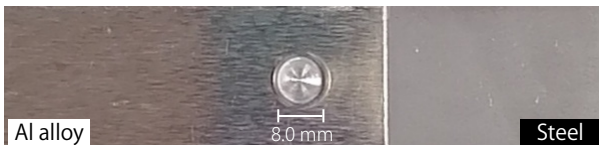


図1 テストピースの外観（中央が接合点）

■X線CTシステムとEPMAによるマクロ観察

X線CTシステムは、非破壊での断面観察が可能で、X線により対象物内の密度の違いを可視化（高密度のものほど白く表示）することで、任意位置の断面画像を表示します。図2(a)は、接合中心部を通る横断面画像で、接合界面の穴の周辺にめっき層（膜厚：約6 μm）の亜鉛（Zn）の排出に伴う濃淡の差が確認できます。図2(b)は、接合面（図2(a)の矢印位置）の縦断面画像で、穴周辺の全方向にZnの排出に伴う濃淡の差が確認できます。

続いて、X線CTシステムで非破壊観察した後の試料を切断し、樹脂包埋後、研磨により断面を作成しました。図3のEPMAによるマッピング分析結果は、接合界面で、FSSW継手のボタン状の穴の外側にめっき層のZnが排出されていますが、一部残存していることが分かります。

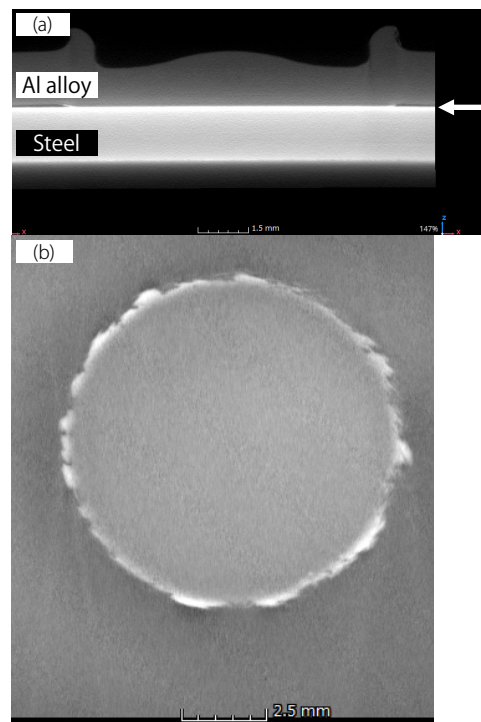


図2 接合点のX線CT断面画像（加圧時間：short）；
(a)横断面、(b)縦断面

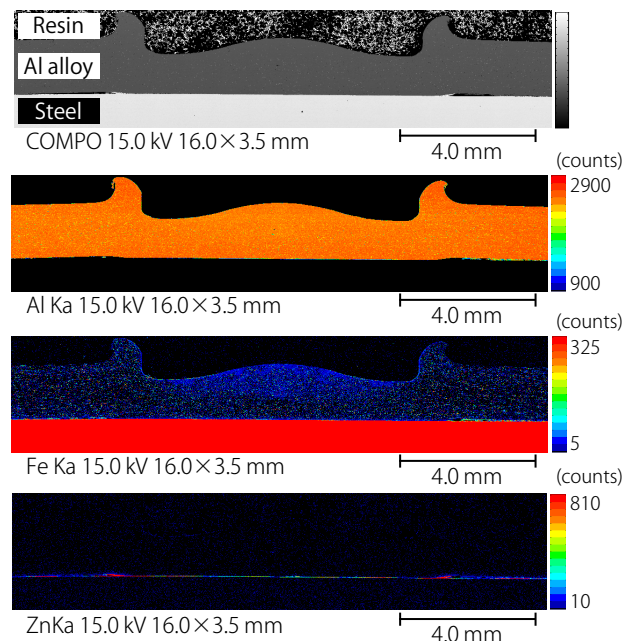


図3 接合点断面のEPMAマッピング（加圧時間：short）

■ EPMAによる接合部の分析

FSSWでは、接合時の入熱量が少ないため接合強度に悪影響を及ぼす金属間化合物（IMC: Intermetallic compound）の形成が少ないのが特徴です。IMC層の膜厚は、中心部が端部よりも厚くなり、GA鋼の場合にはめっき層がIMCに置換されるような現象のため、接合領域全域に数μmのIMC層が形成されます。

図4は、加圧時間：short、longの2条件でFSSWした接合界面のCOMPO像で、Al合金とGA鋼板の接合界面にIMC層が形成されていることが分かります。

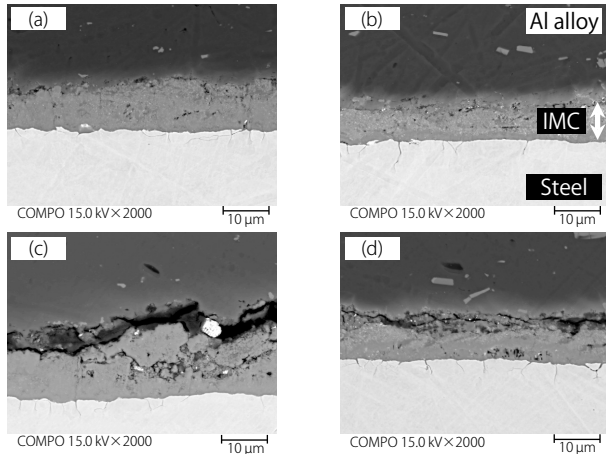


図4 IMC層：

(a)short中心部、(b)short端部、(c)long中心部、(d)long端部

図5は、加圧時間：shortの接合端部（図4(b)）のマッピング分析結果です。接合端部のIMC層の膜厚は約5 μmで、AlとFeとZnの分布が確認でき、めっき層のZnが完全に排出されず、Al合金側により多く残存していることが分かります。Alを赤色、Feを緑色、Znを青色でRGB重ね合わせ表示した図5のOverlay像は、Znの多く残存する領域がマゼンタ色で、AlとFeのIMC層領域がゴールド色で表示されています。

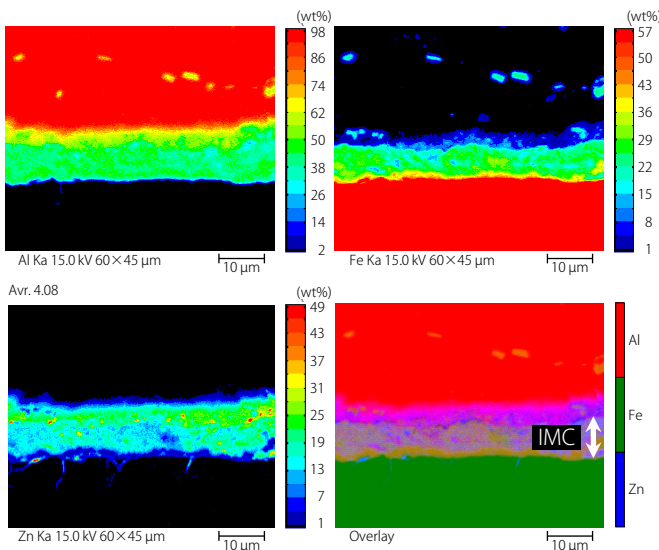


図5 short端部（中心から右（R）へ3.69 mm）のIMC層のマッピング

■ IMC層とクラック

IMC層の膜厚は、図4のように接合条件や中心からの距離で異なります。図6は、各領域を同倍率で膜厚計測した結果です。中心から端部へと離れるほどIMC層の膜厚は薄くなり、加圧時間が長い方が全領域で厚くなっていることが分かります。

接合界面ではZnが完全に排出されず残存しています。図7は、図5のZn分布像と同様に、接合条件と中心からの距離毎に算出した視野内のZn平均濃度を計測した結果です。FSSWでツールの回転により中心から外周へとZnが排出されるので、接合中心部では、Znがほぼ排出され、接合端部の方はZnが多く残存しています。中心と端部の接合中間領域では、加圧時間が短い方がZnは排出され易いと考えられます。

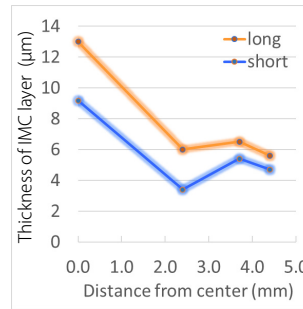


図6 IMC層の膜厚

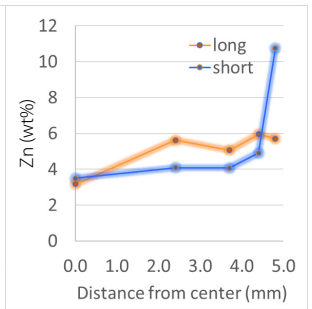


図7 Zn平均濃度

接合界面にはクラックが存在し、その面積率を計測しました。図8は、クラック領域近傍をトリミングしたCOMPO像で、カラー諧調とその面積率を示しています。クラック領域は黒色で表示されるので、図8のようにCOMPO像で黒色エリアの面積率を接合条件と中心からの距離の違いによって計測し、その結果を図9（-Rは中心から右、-Lは中心から左）に示します。加圧時間：longでは、中心と端部の接合中間領域でクラックの割合が多いことが分かります。

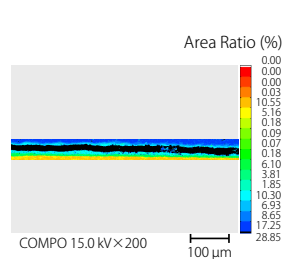


図8 面積率

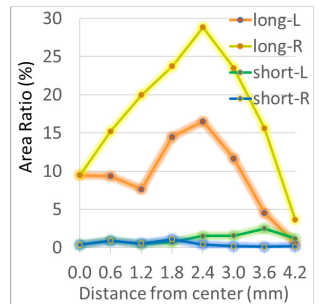


図9 クラック割合

■ まとめ

X線CTシステムの断面画像から、接合部の周囲にZnが排出される様子が確認できます。また、X線CT画像を参照することで、EPMAの断面観察位置を効率的に決定することが可能です。EPMAの分析では、Znの排出が十分でない場合、IMC層の膜厚が厚くなると共にクラック量が多くなり、破断し易くなることが分かります。

<参考文献>

まてりあ, 第53巻 第12号 (2014) Materia Japan
時末光著, FSW (摩擦攪拌接合) の基礎と応用, 日刊工業新聞社 (2005)

EPMA, inspeXio、およびSMXは、株式会社島津製作所またはその関係会社の日本およびその他の国における商標です。

株式会社 島津製作所

本文中に記載されている会社名および製品名は、各社の商標および登録商標です。本文中では「TM」、「®」を明記していない場合があります。

本資料は発行時の情報に基づいて作成されており、予告なく改訂することがあります。

最新版は、島津製作所>分析計測機器の以下のサイトより閲覧できます。
<https://www.an.shimadzu.co.jp/apl/index.htm>

会員情報サービス Shim-Solutions Club にご登録いただけますと、毎月の最新情報をメールでご案内します。新規登録は、<https://solutions.shimadzu.co.jp/> よりお願いします。

初版発行：2022年 2月
01-00294A-JP A改訂版発行：2022年 6月

島津コールセンター ☎ 0120-131691