

【研究論文】

【令和4年度 県単独試験研究】

工業材料の加工プロセスと評価技術の確立

阿部 一彦

材料開発・分析技術部

県内企業では、様々な工業材料を用いて、様々な加工方法により生産活動を行っており、使われる材料は金属、無機材料、有機材料と様々である。一方地域ものづくり企業のSDGsへの取組の一環としてエネルギー消費低減のためのマルチマテリアル化が推進されており、複合材料や異種材料の接合が重要な課題となっている。本研究ではプラスチック-金属接合や異種材料の接合に関して県内企業と取り組み、様々な成果を上げることができた。本報告では、その中でも県単独で実施した異種金属間の接合について報告する。

キーワード：複合材料、異種材料接合

1 緒言

地域のものづくり企業では、顧客のニーズやトレンドに沿って材料を選択し、自社の強みとする加工(塑性加工・機械加工・二次加工)技術をさらに高度化させることで競争力のある製品を製造している。最近では、持続可能な循環型社会の推進・2050年温室効果ガスの実質排出ゼロ(カーボンニュートラル)、デジタルトランスフォーメーション(DX)などの社会的トレンドを踏まえ、ものづくり企業としてもSDGsを念頭においた企業活動が求められている。

中でも、地球温暖化対策のためのCO₂削減、さらに燃費向上を目的として、自動車などの輸送用機械を軽量化させるための取り組みが注目され、複数の素材を組み合わせ、軽量化させつつ高強度を達成するマルチマテリアルの研究が進められている。特に、強度が高い鉄(Fe)と、密度が低くて軽量であるアルミニウム(Al)の接合については盛んに取り組みが進められている。黒田らは、高周波誘導加熱型の真空接合装置にてA6061とSUS316を接合させたところ、接合界面において、主としてFe₂Al₅及びFeAl₃からなる反応層が形成され、反応層厚さが1~2 μm程度において接合強さが最大になったと報告している¹⁾。この他、放電プラズマ焼結機(SPS)を用いたSKD61とアルミ合金の固体接合²⁾や抵抗スポット溶接法によるFeとAl接合³⁾、摩擦拡販接合による接合⁴⁾など、様々な方法で接合が試みている。

宮城県でも樹脂-金属複合化に向けて、異種接合界面の評価技術に関する研究が進められているが⁵⁾、異種金属同士の接合については、斎藤⁶⁾が複合材での検討

を行うにとどまってきた。そこで、基本的な工業材料であるFeとAlの接合について検討を行ったので報告する。

2 ホットプレスによるFeとAlの接合

まずホットプレス(東京真空(株)GP-2300)による基礎的なFeとAlの接合実験を行った。

供試材としては市販の機械構造用炭素鋼S45Cと純アルミA1070を用いた。両試料とも溶製材の丸棒から切り出し、形状はS45CがΦ20 mm×20 mm、A1070はΦ25 mm×20 mmの円筒形である。接合面の処理は、P240のSiC研磨紙で乾式研磨を行い、水洗後エアでダストを除去した。接合条件は、接合温度450 °C、加圧力1 ton、接合時間360 min、真空度10 mPaで実施した。接合体を図1に示す。上の試料がS45C、下の試料がA1070である。S45CがA1070の面に食い込み、A1070がたわんでいるのが確認できる。これは、450 °Cで約30 MPaの負荷をかけたことによるアルミの軟化が原因である。



図1 S45CとA1070の接合写真

S45CとA1070の接合界面の光学顕微鏡観察結果を図2、SEM観察結果を図3に示す。接合界面に中間層が確認できる。

この中間層について、SEM/EDXを用いて定性分析とマッピングを行った結果を図4、図5に示す。中間層の定性分析ではFe、Alの両方が検出され、マッピング結果からは、この接合部分はAl中にFeが拡散している様子が確認できた。

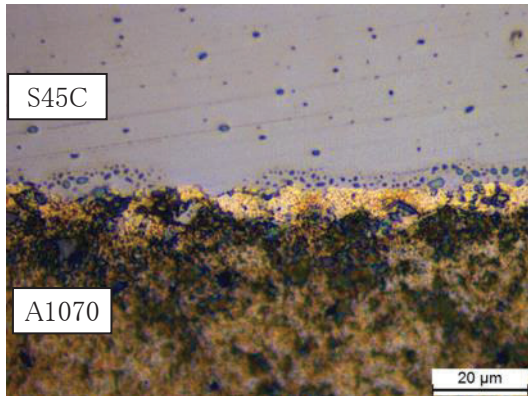


図2 S45C/A1070接合界面の状態

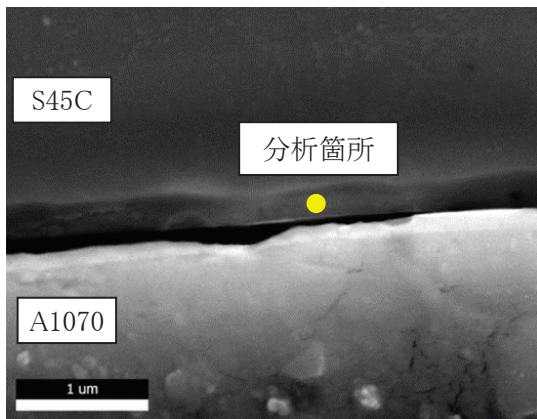


図3 S45C/A1070接合界面の拡大状態

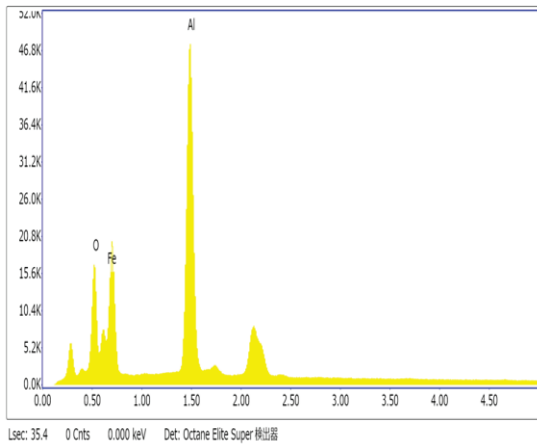


図4 測定箇所の定性分析結果

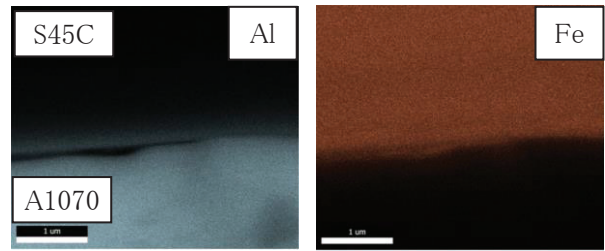


図5 マッピング結果(左)Al(右)Fe

3 パルス通電焼結によるFeとAlの接合

ホットプレスによりFeとAlの接合の可能性が示されたが、高温下で長時間、加圧することによりAlが変形してしまう課題が明らかになった。そこで、より低温で焼結等を行えるパルス通電焼結装置(住友石炭鉱業: Dr.Sinter SPS-7.40)での接合を検討した。パルス通電焼結法は機械的な加圧とパルス通電加熱とによって、被加工物の焼結・接合・合成を行う加工法で、一般的な焼結に用いられる熱的及び機械的エネルギーに加えて、パルス通電による電磁的エネルギーや被加工物の自己発熱などを複合的に焼結の駆動力とするため、接合温度を低減できる可能性がある点に大きな特徴がある。

加えて切削や鋳造などの従来の加工法では難しい3次元複雑形状品の加工が可能で、IoT(Internet of Things;モノのインターネット)などの整合性が高い、次世代の加工技術として注目されている金属積層造形品の接合を試みた。供試材としては新たに、金属積層造形(レーザー式粉末床溶融結合法)で作製したSUS316Lと市販の純アルミA1070を使用した。SUS316Lは30 mm×25 mm×5 mmの角型である。

接合条件は、接合温度350～450℃、加圧力1～2 ton、接合時間20～180 min、真空度5 Pa以下の複数の条件で実施したが、いずれも接合には至らなかった。

接合試験後の供試材の一例を図6に示す。試験時間がホットプレスよりも短時間で、温度による影響が少ないと予想していたが、実際にはA1070が加熱下で圧縮され、歪んでいることが分かる。

そこで、試料を鏡面研磨し、さらにカーボンシート厚くして、試料間の密着性を向上させ、凹凸による局所電流を低減すると共に、全体として電流が流れる断面積を増やすことでジュール熱による温度上昇を抑えて接合することを試みた。

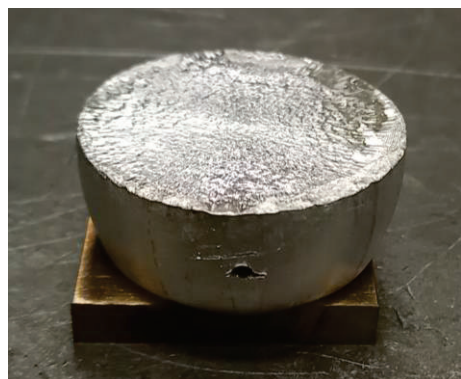


図6 試験直後のSUS316LとA1070

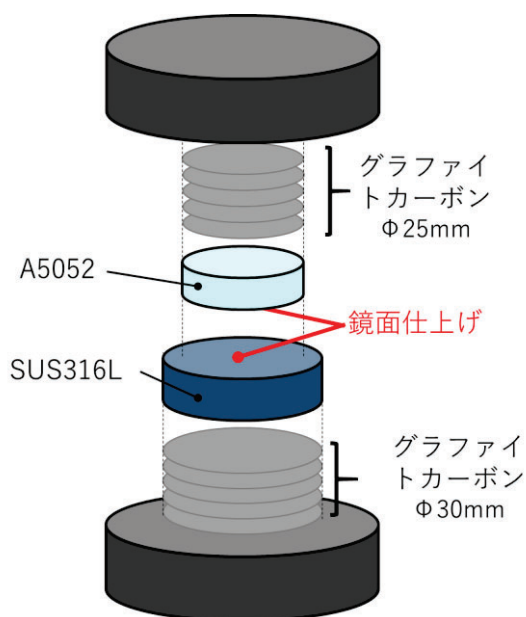


図7 局所電流を抑えた接合試験

さらに供試材としては、金属積層造型品のSUS316Lとアルミ溶製合金の一般構造材料であり加工性のよいA5052を利用した。SUS316LはΦ30 mm×10 mmの円筒形である。一方A5052はΦ25 mm×10 mmである。A5052は丸棒から切り出した。

接合面は面出し後、バフ研磨で中間研磨を行い、酸化ケイ素研磨剤を用いて仕上げ研磨を行った。

接合条件は、接合温度300 °C、加圧力1 ton、接合時間30 min、真空度5 Pa以下とした。

その結果を図8に示す。上の試料がA5052、下の試料がSUS316Lである。A5052の融点はA1070よりも低いにも関わらず、鏡面研磨と密着性向上により電流路の断面積が増したことで、ジュール熱が抑制され、熱によるAlの変形は抑制されていることがわかる。

SUS316LとA5052の接合界面の光学顕微鏡観察結果を図9、SEM観察結果を図10に示す。接合界面に中間層が確認できる。なお SUS316LとA5052の境界面の空隙

は、断面観察試料作成のために切断したことにより発生した可能性が考えられる。

この中間層について、SEM/EDXを用いて定性分析を行った結果を図4に示す。Fe、Alのほか、SUS316L成分のCr、Niや、A5052の成分であるMgなどが検出された。従って、中間層についてはSUS316LとA5052双方から拡散が起こった可能性が示唆された。



図8 SUS316LとA5052の接合写真

SUS316LとA5052の接合界面の光学顕微鏡観察結果を図9、SEM観察結果を図10に示す。接合界面に中間層が確認できる。なお SUS316LとA5052の境界面の空隙は、断面観察試料作成のために切断したことにより発生した可能性が考えられる。

この中間層について、SEM/EDXを用いて定性分析を行った結果を図11に示す。Fe、Alのほか、SUS316L成分のCr、Niや、A5052の成分であるMgなどが検出された。従って、中間層についてはSUS316LとA5052双方から拡散が起こった可能性が示唆された。

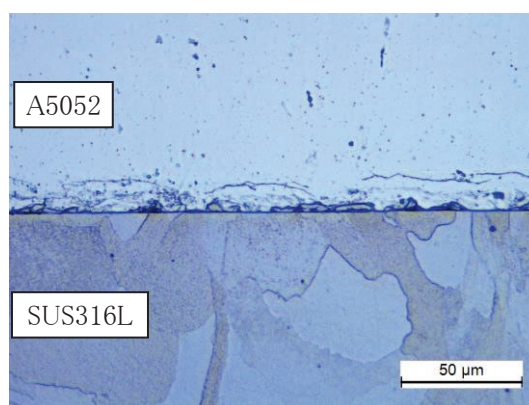


図9 A5052とSUS316L接合界面の状態

さらに、中間層のマッピングを行った結果を図12に示す。定性分析を行った箇所ではAl、Feそれぞれの元素が観察され拡散が起こっている様子は確認されなかつ

たが、その周辺ではAlとFeが重複して観察される領域があった。アルミニウムと鋼間の圧接接合ではAl中にFeが拡散し金属間化合物が生成されることが報告されていることから⁷⁾、本接合でも同様にSUS316LとA5052間でAlとFeの拡散接合が行われたと考えられる。

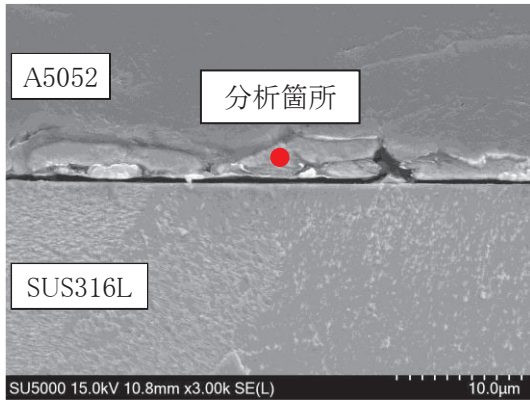


図10 SUS316LとA5052接合界面の拡大

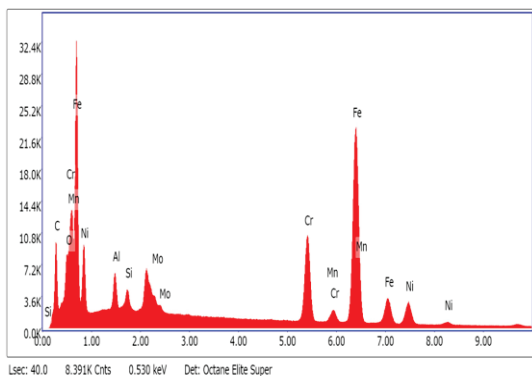


図11 測定箇所の定性分析結果

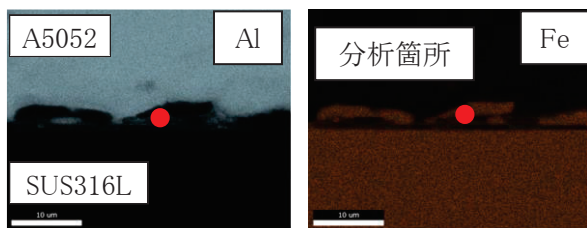


図12 マッピング結果(左)Al(右)Fe

4 結言

今回、金属異種接合の実現可能性を探るため、当センターの焼結機を用いてFeとAlの接合を行った。ホットプレスを用いた実験では、低加圧力、長時間保持の条件で市販品のS45CとA1070の接合に至ったものの、A1070に変形が生じてしまった。次にパルス通電焼結装置を用いて金属積層造形品のSUS316Lと市販品の

A1070の接合を行ったが接合には至らず、A1070は変形してしまった。これは局所的に温度が想定以上に上昇したためと考え、接合温度をアルミニウムの融点の半分以下に抑え得るだけでなく、SUS316LとAA5052間の密着性を向上させ、ジュール熱による局所温度上昇を抑えることで、アルミニウムの変形を極力減らすとともに、SUS316LとA5052の間に均一に電流を流すことで接合に至ることができた。今後は条件を詰めると共に、引張試験を行って強度評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 黒田晋一、才田一幸、西本和俊. A6061とSUS316の直接接合部の組織と特性. 溶接学会論文集. 1999、17(3)、pp.484-489
- 2) 鶴田正雄. 放電プラズマ焼結(SPS)技術の接合加工分野への新展開. 溶接学会誌. 2004、73(4)、pp.238-245
- 3) 武田実佳子、漆原 亘、松本克史、加藤 潤. 抵抗スポット溶接法によるFe-Al異材接合技術の開発. 神戸製鋼技報. 2007、57(2)、pp.69-73
- 4) 田中 努、森重 大樹、平田智丈. 純アルミニウムと軟鋼の異種金属摩擦攪拌接合材の接合界面における金属間化合物形成機構. 溶接学会論文集. 2011、29(2)、pp.101-106
- 5) 佐藤勲征、四戸大希. マルチマテリアルを支える異種接合界面の評価技術に関する検討. 宮城県産業技術総合センター研究報告. 2021、18、pp.45-48
- 6) 斎藤雅弘、久田哲弥、矢口 仁. 先端機能材料を用いた柔構造機械システムに関する基礎研究. 宮城県工業技術センター研究報告. 1998、29、pp.53-57
- 7) 沓名宗春ら. レーザーロール圧接によるA5052アルミ合金とSPPC鋼の接合. 溶接学会論文集. 2003、21、pp.282-294