

IMCフリーな異材接合界面の形成に向けた 高濃度多元系溶接材料の探索

山本 啓

大阪大学 接合科学研究所

1 研究背景

カーボンニュートラルの実現に向けて、軽量のAl及びその合金と高強度の鉄鋼を組み合わせたマルチマテリアル化が輸送機器に対し積極的に推進されている。そのため、両者の異材接合は重要技術として注目されているが、AlとFeの接合界面には、両元素の反応によって脆性的な金属間化合物（IMC：Intermetallic compounds）層が形成されることはよく知られている。良好な継手強度を得るためには、接合時におけるIMC層の生成量を最小限に抑えることが求められる。

Al/Fe界面に形成されるIMC層の抑制には接合時の入熱低減が有効であるが、実用上困難なプロセス条件となる場合が多い。そこで本研究では、材料学的なアプローチとしてハイエントロピー効果に着目した。ハイエントロピー効果は、近年注目されているハイエントロピー合金の持つ特徴の一つで、化学組成を高濃度多元系化することで配置エントロピーの増加に伴い熱力学的に安定な固溶体相が形成される現象である。当該効果を溶接金属中あるいは接合界面のような局所領域で活用することができれば、脆性的なIMC層の形成を抑制し、延性に富んだ固溶体相の領域を拡大できると考えられる。それを実現する異材接合用溶接材料の開発に向けて、本報告では母材元素とは異なる複数の元素を高濃度に含有したインサート材を用いてAl/Fe異材溶接継手を試作し、継手強度への影響について調査した成果の概要を述べる。

2 研究方法

母材のAl及びFe板には、それぞれA1050（2mm厚）及びSUY-0（1mm厚）を使用した。両板間の接合界面への元素添加を目的として、0.5mm厚のAl、NiCuCo、NiCuCr、NiCuCoCrの4種類のインサート材を作製した。NiCuCo、NiCuCr、NiCuCoCrインサート材の化学

組成は、母材希釈を考慮しFeを除く第4周期金属元素を複数組合せ、等しい原子濃度となるように設計している。母材と同じ化学組成を持つAlインサート材は、それらとの比較のために使用した。

Al板の上にFe板を幅2mm重ね、両板の間にインサート材を挿入し、Fe板上面からファイバーレーザを照射することで溶接継手を作製した。溶接条件は、レーザ出力8kW、溶接速度1.5m/min、ビーム径2.2mm、掃引角度20deg.に設定し、シールドガスにはArを用いた。

上記にて得られた継手の断面を鏡面研磨し、各種顕微鏡により微細組織を観察した。溶接方向に対し直角方向に幅10mmの短冊状試験片を各3本ずつ切り出し、室温にて引張せん断試験を行い、継手強度を評価した。

3 主な研究成果

各インサート材を用いて作製したAl/Fe異材重ね継手の断面像を図1に示す。いずれの継手においても、上板のFe母材端部と下板のAl母材の間に挿入されたインサート材は両母材とともに完全に溶解していた。EPMA結果より、インサート材由来の元素はAl側の溶接金属中でほとんど検出されず、Fe側の溶接金属中において

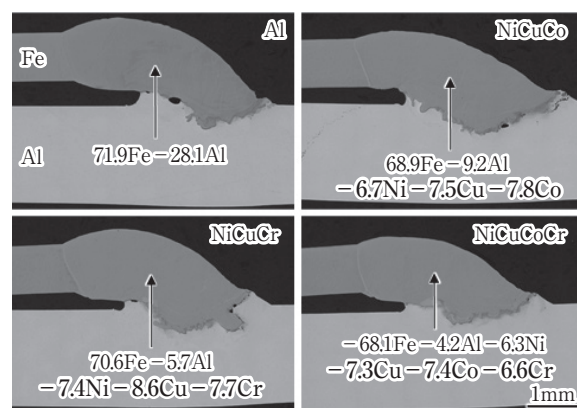


図1 各種インサート材を用いたAl/Fe異材重ね継手の断面像とFe側溶接金属中の平均濃度

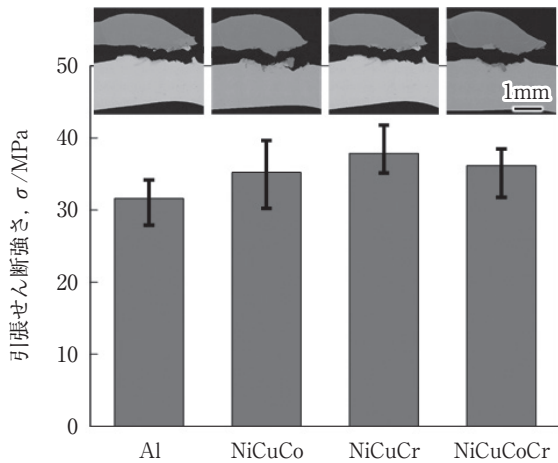


図2 引張せん断強さと試験後試験片の断面写真

均一に混合していることが明らかとなった。Fe側溶接金属中の化学組成はいずれもFeが約70at%を占めており、Alやインサート材由来の元素の合計が残りの約30at%を占めるという共通の傾向がみられた。FeとAl以外の元素は、インサート材の化学組成に依存して等原子濃度比に近い状態(図1中に付記)で存在していた。

インサート材元素の違いが継手強度に及ぼす影響について調査するため、引張せん断試験を行った。3本平均の引張せん断強さと試験後の試験片の断面写真の例を図2に示す。いずれの試験片においても、IMC層が形成されたAl/Fe異相界面近傍をき裂が進展して破断に至った。Alインサート材を用いた継手の引張せん断強さは最小であったが、高濃度多元系インサート材を用いた継手は全体的にそれよりも高く、NiCuCrインサート材において最大となった(Alインサート材に対して約20%増加)。Alインサート材を用いた継手の破面は全面で脆性破壊を呈した一方、高濃度多元系インサート材を用いた継手破面では部分的にディンプルパターンが観察された。

引張せん断試験において破断起点となったIMC層にはAlが80at%前後含まれ、その他の元素はFe側溶接金属と同様に、インサート材の化学組成に依存してほぼ等原子濃度比で存在していた。インサート材元素の違いがIMC層の生成量に及ぼす影響を調査するため、異相界面近傍で撮影した光学顕微鏡像からIMC層の平均厚さを算出した。IMC層の形状や厚さが均一ではないため、図3の一例に示すようにIMC層の面積を画像処理により測定し、それを異相界面の長さで除すことでIMC層の平均厚さを定義した。

IMC層の平均厚さと引張せん断強さの関係を図4に示す。Alインサート材を用いた継手は最もIMC層が厚

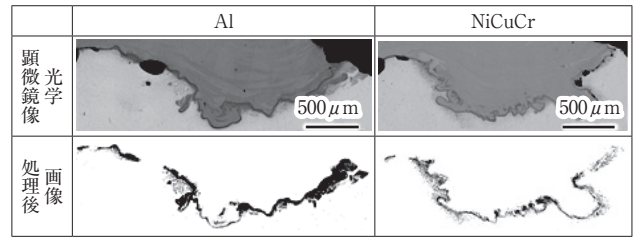


図3 Al/Fe異相界面近傍の断面写真と画像処理によるIMC層抽出例

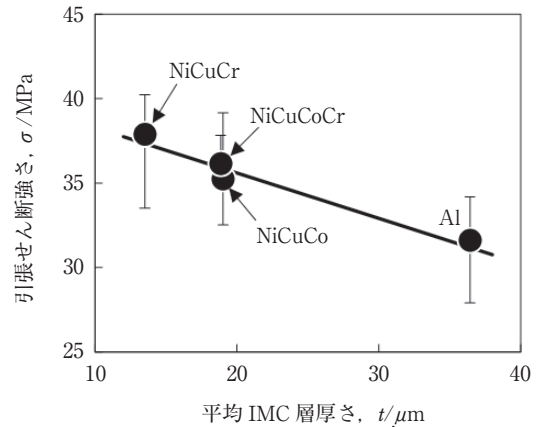


図4 IMC層の平均厚さと引張せん断強さの関係

くなり、高濃度多元系インサート材を用いた場合には層厚が半分程度にまで低減された。元素数の最も多いNiCuCoCrインサート材よりもNiCuCrインサート材を用いた継手の方がIMC層の厚さが薄くなった理由は明らかではないが、高濃度多元系化によるIMC層抑制効果の程度は元素の組合せに影響されると考えられる。これらIMC層の平均厚さと引張せん断強さには相関がみられ、従来知見と同様にIMC層が薄いほど継手強度が増加する傾向がみられた。高濃度多元系インサート材を用いることで、異相界面において延性的な固溶体相の領域の増大に伴い脆性破壊の発生頻度が低減し、継手強度が向上したことが示唆された。

4 今後の展望

上記のように、Al/Fe異材接合において適切な元素組合せで界面を多元系化することにより、IMC層の抑制とそれに起因する継手強度の向上が得られ、本アプローチの有効性を示すことができた。一方、その効果は依然として十分とはいえず、現状の実験方法ではインサート材に対する母材希釈率が大きく、溶接金属中への元素添加量が30at%程度にとどまったことが最大の要因と考えられる。今後、溶接ワイヤの作製や母材希釈の少ない溶接法の適用等を試み、当該効果の更なる促進に向けたプロセス開発と界面組織形成機構の解明に取り組みたい。