

論文の内容の要旨

論文題目 Mg 合金と鋼の反応型液相拡散接合とその界面形成に関する研究

氏名 荒木 俊雄

自動車などの移動構造体は燃費の向上を目的とした軽量化が進められ、これまでもアルミニウム合金や樹脂製品といった軽量材料の使用によって達成してきた。しかし、環境意識の高まりから更なる燃費向上が求められる現在、より軽量な構造体が必要とされるようになってきている。この構造体軽量化への要求に応えるために期待されている材料がマグネシウム合金である。マグネシウム合金は実用金属材料の中で最軽量であり、高比強度、高剛性を示す。そのため構造体の強度を維持しつつ、軽量化を行うことが可能である。また、豊富な資源量や高いリサイクル性など、構造材料として高いポテンシャルを持っている材料である。マグネシウム合金の適用は既に行われており、自動車のエンジンクレードルやギアボックスなどに使用されているが、構造体をより軽量にするためには、ボディフレームやパネル部といった構造体フレーム部への適用が必要となる。マグネシウム合金の適用範囲の拡大には、マグネシウム合金と異種金属材料との接合が不可欠であり、特に主要な構造部材である鉄鋼材料との接合は避けられないプロセスとなる。しかし、マグネシウムと鉄の組み合わせは、融点差が約 900°C と非常に大きく、相互にほとんど固溶しない・反応しないことから、溶融接合・拡散接合といった従来の技術による接合は極めて困難であり、その接合に関する検討は限られている。近年になって、摩擦攪拌接合を用いた接合の検討が行われるようになり、高い接合強度が得られているが、面と面の接合や小さな部材もしくは曲面などの複雑な形状を持つ部材への適用が困難である。マグネシウム合金の適用範囲を拡大するためには、様々な形状、サイズに適用可能なマグネシウム合金/鋼の接合法の開発が必要である。

そこで本研究では、マグネシウム合金と鋼の接合を達成する新しい手法の開発に取り組んだ。接合を達成させるために開発した手法は、接合界面に新しい相を形成させるというものであり、マグネシウム合金と鋼はこの相を介して接合されると考えた。そして、このような相を形成させる接合モデルを構築するとともに、接合部組織と接合強度の関係と接合部組織形成について評

価を行い、開発した手法を用いてマグネシウム合金と鋼の接合を達成するため指針を得た。

まず、マグネシウム合金／鋼の接合界面に、新しい相を形成させる接合モデルを考えた。この相は、接合母材であるマグネシウム合金と鋼の合金添加元素を利用し、それらの反応によって形成させることとした。この反応相を接合面全体で均一に生じさせるためには、接合面全域が密着していること、接合面全域で反応する元素濃度が均一であることが必要と考えられ、そこで接合部間隙を埋めると共に接合面全域で均等な濃度を保ちうる液相を接合に利用することとした。液相は残留・凝固すると母材と異なる組織を形成するため、接合完了時には残らないことが重要となり、この条件を満たすために、液相拡散接合 (TLP: Transient Liquid Phase) の概念を利用することとし、次のような接合モデルを構築した。

- ・マグネシウムと共晶反応を生じかつマグネシウムに固溶する金属を接合界面にインサートし、共晶温度以上に加熱し液相を形成させる。
- ・この液相の存在下において反応元素の拡散を促し、マグネシウム合金と鋼の接合界面に均一な反応相を形成させる。形成した液相は TLP プロセスに従い、インサート金属が接合母材に拡散することによって消失していく。
- ・液相が完全に消失することで接合が完了し、マグネシウム合金と鋼が接合される。

本研究では、この接合モデルによる手法を、反応型液相拡散接合法と呼ぶこととした。この接合法が実現可能であるかについて、①液相形成および消失、②反応相形成および③達成される接合強度をポイントとして検討を行った。①については、Ag および Zn をインサート材として用いることで液相が形成されるとともに、TLP プロセスで予測される液相消失が確認された。②については鋼/液相界面組織に接合母材と異なる相の形成が見られ、この相は Fe-Al の金属間化合物である Fe_2Al_5 であり、マグネシウム合金中の Al が鋼と反応したことが示された。また界面全域において均一に形成される結果も得られた。③については、液相が消失した条件において接合部強度を行うことで評価し、Al を含有しない純マグネシウム／鋼の接合やマグネシウム合金／鋼の固相接合の強度と比べて、反応型液相拡散接合は非常に高い引張強度を示した。これらの結果から、構築した反応型液相拡散接合法を用いることで、マグネシウム合金と鋼の高強度接合が可能であることを示唆する結果が得られた。

次に、接合強度と接合部組織の関係について検討した。反応型液相拡散接合法によって得られた接合強度は、接合部に形成された Fe-Al 金属間化合物組織によって変化した。Fe-Al 金属間化合物は鉄とアルミニウムの接合において必ず形成され、非常に硬く脆い相である。そして化合物が厚くなると接合強度の著しい劣化を引き起こすことが報告されており、本研究においても同様の結果が得られた。しかしながら同時に、化合物厚さ以外にも接合強度に影響を及ぼす因子の存在が示唆された。そこで、接合界面に形成される金属間化合物組織が接合強度に及ぼす影響について詳細な検討を行った。接合強度測定後に得られた破断面を観察したところ、破断形態が変化する様子が見られ、接合強度が低くなるにしたがい、平滑な破断形態となった。き裂断面の観察から、この平滑な破断形態は化合物内の破断によって生じていること、この化合物内破断は FeAl と Fe_2Al_5 の界面で生じていることが示された。接合界面に形成される金属間化合物が複相化すること

により接合強度は低下したと考えられる。また、 FeAl と Fe_2Al_5 の界面の破壊靱性値を評価すると非常に弱い強度の界面である結果が得られた。接合強度に及ぼす Fe-Al 金属間化合物組織の影響として従来は化合物厚さのみが検討されてきたが、化合物組織の形態、化合物相の複相化によっても接合強度は影響されることが考えられる。

このような金属間化合物の変化は、化合物の形成にマグネシウム合金中の Al を使用する点から、Al の供給量が影響すると考えられる。Al は固相マグネシウム中の拡散で供給されるため、時間とともにその供給量は変化する。化合物が Fe_2Al_5 単相で形成される場合では十分な量の Al が供給されているが、 FeAl が形成され化合物が複相化する場合は Al の供給が不足しているとみなすことができる。供給 Al 量と Fe_2Al_5 単相を形成するために必要な消費 Al 量の比較を行うと、一定時間を超えると必要 Al 量が供給 Al 量を超える結果となる。この時間は、接合試験において接合強度が著しく低下する時間と同程度となり、接合強度低下を起こす複相化は Al の供給が不足した場合に生じることが示唆された。高強度接合を達成するためには、十分な Al が供給される条件化において接合を完了する必要があると考えられる。反応型液相拡散接合法の接合完了時間は、インサート材の拡散から予測することが可能である。化合物が単相で形成される時間内に接合プロセスが完了するようにインサート材厚さを設定することで、界面に形成される組織を制御し、高強度接合が得ることが可能であると言える。

本研究で開発した反応型液相拡散接合法は、接合界面において意図的に反応相を形成させる新しい接合法である。この接合法は、従来の接合技術では困難とされていたマグネシウム合金と鋼マグネシウム合金の高強度接合を可能にし、マグネシウム合金の適用範囲の拡大とそれに伴う構造体の更なる軽量化へ寄与すると期待される。