

難燃性マグネシウム合金の車両構体への適用可能性

材料技術研究部 摩擦材料研究室

主任研究員 森 久史

1. はじめに

新幹線電車のさらなる省エネルギー化が求められ、車両の軽量化はそのための技術課題の一つとして挙げられる。車両の軽量化には軽量材料の適用が有効であると考えられており、新幹線電車の車両構体へのアルミニウム合金の適用によりその効果が確認されている¹⁾。今後、車両構体の軽量化をさらに図るためには、アルミニウム合金よりも軽量である難燃性マグネシウム合金の適用が考えられる。難燃性マグネシウム合金は、マグネシウム合金にカルシウムを添加して発火性を抑制した材料であり、この適用により、従来から問題とされてきた難燃性については改善できると考えられる²⁾。しかし、鉄道車両構体へ適用するには強度の確認等の課題も多い。そこで本研究では、最初に車両構体への適用を目標として、新規の難燃性マグネシウム合金を試作して、金属組織の特徴、難燃性の確認、機械的性質等を調べた。また、剛性を確保するための中空形材の試作の検討や車両を製造するために必要となる溶接・接合技術について調べた。

2. 合金材の試作及び金属組織の特徴

一般的なマグネシウム (Mg) 合金の材料設計では、高強度化を目的としてアルミニウム (Al)、铸造性を改善するため亜鉛 (Zn) が添加される。そこで、本研究では、亜鉛、アルミニウムおよびカルシウム (Ca) を化学組成とするマグネシウム合金を試作した。図 1 にマグネシウムにアルミニウムを 6%、亜鉛を 1%、カルシウムを 1% 添加した難燃性マグネシウム合金 (Mg-6Al-Zn-Ca 合金 (以降、AZX611 合金とする)) を大気および真空中で溶解して铸造した時の金属組織を示す。大気铸造では欠陥が顕著に認められた。一方、真空铸造では欠陥の発生のない良好な金属組織が得られた。これらよりマグネシウム合金の試作では雰囲気の影響が大きいことが分かり、真空铸造によって欠陥の発生がない良好なマグネシウム合金が作製できることを確認した。

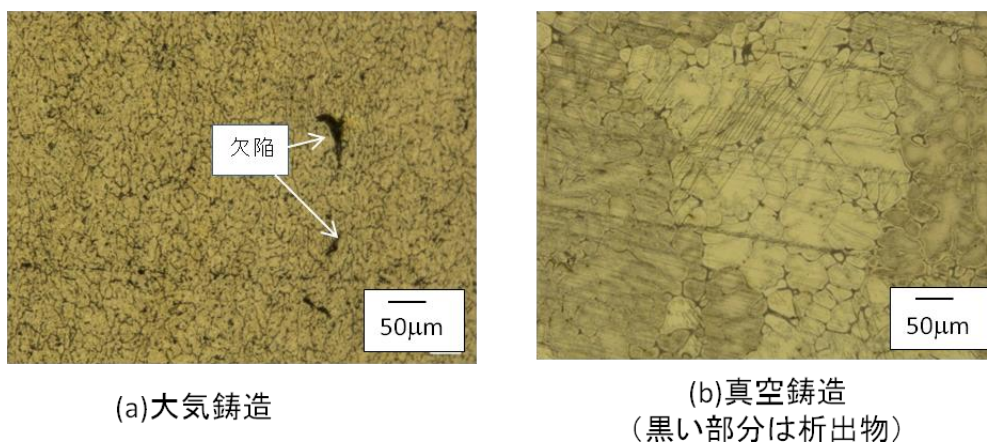


図 1 铸造雰囲気を変えて作製した難燃性マグネシウム合金の金属組織

3. 難燃性の確認

試作したマグネシウム合金の難燃性を調べた。難燃性を示す定量的な指標がないため、本調査では試験材を直接ガスバーナで加熱し、加熱中の温度を熱電対により測定して発火性の有無で難燃性を評価した。試験には、カルシウムの添加の有無の影響を調べるために、AZX611 合金とそのカルシウム未添加材（Mg-6Al-Zn 合金：AZ61 合金）を用いた。また、アルミニウム合金との比較を行うために、6000 系アルミニウム合金（6N01 合金）も用いた。

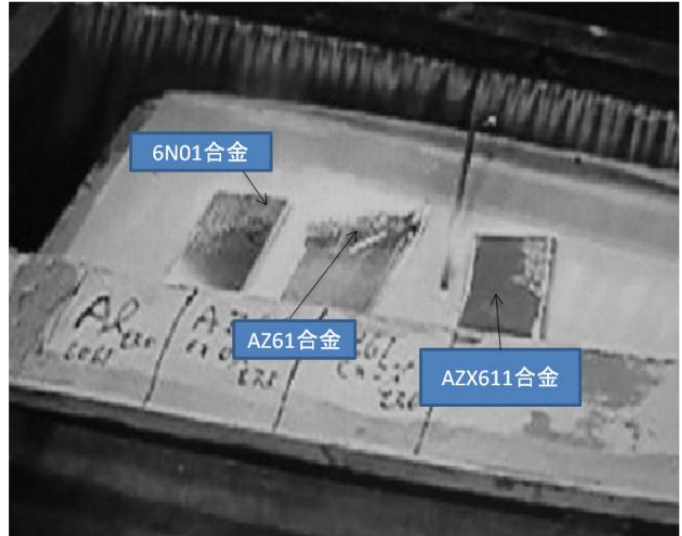


図 2 難燃性の試験状況

図 2 に難燃性試験の試験状況を示す。カルシウムが添加されていない AZ61 合金では 450°C で発火し始めたが、それにカルシウムが添加されている AZX611 合金と 6N01 合金では発火は認められなかった。このことから、AZX611 合金の難燃性は 6N01 合金と同等であり、カルシウム添加によって、マグネシウム合金の難燃性が向上することを確認した。難燃性が向上するメカニズムは、材料表面の酸化被膜の形成により酸素を遮断するためであると考えられるが、詳細なメカニズムの検討は今後の課題である。

4. 機械的性質の評価

マグネシウム合金中のアルミニウムの量は、析出物の発生量に影響を及ぼし、析出物の量や分散状態が強度に影響を与えると考えられる。そこで、亜鉛を 1%，カルシウムを 1% 添加し、アルミニウムの添加量を 3，6，9% に変えたマグネシウム合金を作製して引張試験を行った。表 1 に試作材の引張特性（0.2% 耐力，引張強さおよび伸び）を示す。Al 添加量が 6% 及び 9% のマグネシウム合金（AZX611 合金および AZX911 合金）は、耐力が 6N01 合金の最低値以上を示すことを確認した。

表 1 難燃性マグネシウム合金の引張特性の調査結果

合金記号	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
Mg-3Al-Zn-Ca (AZX311 合金)	230	255	16
Mg-6Al-Zn-Ca (AZX611 合金)	270	285	15
Mg-9Al-Zn-Ca (AZX911 合金)	260	270	7
6N01 合金 (JIS)	250 以上	-	20 以上

5. 中空型材の試作の検討

アルミニウム合金を車両構体に適用する際、鉄鋼材料に比べて弾性率が低いために剛性の確保が課題であり、このことからトラス形状の中空型材が用いられるようになった¹⁾。難燃性マグネシウム合金の弾性率は一般的なマグネシウム合金と変わらず、アルミニウム合金よりも低い。そのため剛性に関する検討が必要になる。そこで、難燃性マグネシウム合金による中空型材の作製の可能性を確認するために、中空型材の試作を行なった。

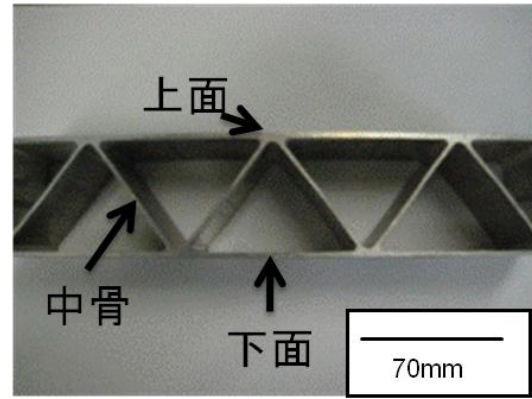


図3 試作した中空型材の外観

試作に当たり、剛性を設定して型材の形状を決めることが必要である。本研究では、モデル型材として、幅が 250mm、高さが 50mm、長さが 1000mm の型材を試作した。その際、目標寸法として、上面および下面肉厚を 2.0mm、中リブ（中骨）の肉厚を 1.5mm とした。

図3に試作した AZX611 合金の中空型材の外観を示す。試作した結果、ほぼ目標に近い寸法の中空型材が作製できた。試作数等にも課題があるが、このようなマグネシウム合金の中空型材の作製できることを初めて確認した。今後、さらに難燃性マグネシウム合金製の中空型材の形状の見直しおよび寸法精度の向上をすすめるとともに、高精度な長尺材の試作について検討する予定である。

6. 溶接・接合法の検討

車両への適用において溶接・接合法の検討が必要になる。現在、アルミニウム合金製の車両の修繕では TIG アーク溶接（TIG 溶接）、車両の製造では MIG アーク溶接（MIG 溶接）及び摩擦攪拌接合（FSW）が適用されている³⁾。事前に行った難燃性マグネシウム合金の MIG 溶接では溶接棒の溶融現象、アークの不安定現象が発生する等などから MIG 溶接を適用するにはさらに基本的な溶接技術について検討が必要になることが明らかになった。そこで、難燃性マグネシウム合金に TIG 溶接および FSW を行い、その適用を検討した。

図4にはアルミニウム合金で TIG 溶接を行う同条件で、AZX311 合金及び AZX611 合金を TIG 溶接してその断面のマクロ状態を観察した結果を示す。この結果から、断面部にも欠陥の発生がない溶接部が得られることを確認した。

また、アルミニウム合金の溶接条件で難燃性マグネシウム合金の TIG 溶接が行えることも確認できた。これら溶接材について引張試験を行った結果、TIG 溶接では熱影響部での破断が認められた。また継手効率（母材の引張強さに対する溶接材の引張強さの割合）は母材の 75%~80%であった。

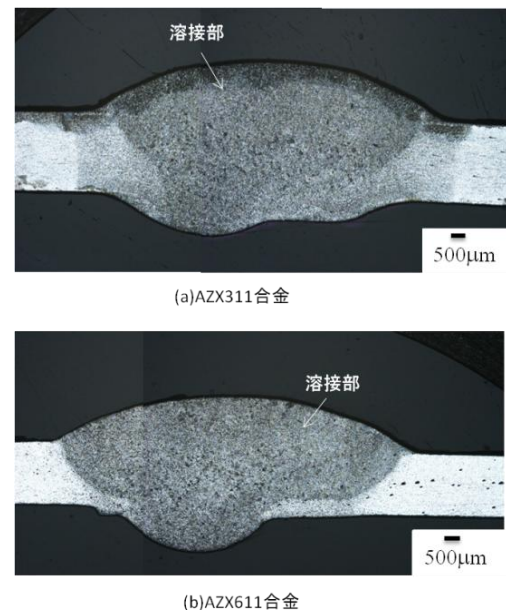


図4 TIG 溶接材の断面マクロ観察結果

TIG 溶接のような入熱溶接に対し、近年、入熱が少ない FSW が注目され、アルミニウム合金製車両の製造にも使用されている³⁾。そこで、アルミニウム合金の FSW と同条件で、難燃性マグネシウム合金を FSW により接合した。AZX611 合金を FSW によって接合した断面金属組織の観察結果を図 5 に示す。

接合部には円状のオニオンリング状組織と呼ばれる組織変化が観察された。これは FSW の接合部に認められる特有の金属組織であり、特に異常な状態ではない⁴⁾。また、接合部を詳細に観察すると、攪拌部（接合部中心）と熱影響部では金属組織が異なり、攪拌部が熱影響部よりも微細である。これも FSW の特徴として認められる金属組織変化である。このように難燃性マグネシウム合金を FSW によって接合した結果、アルミニウム合金における一般の FSW の接合部に認められるような金属組織が得られている。

さらに FSW によって接合した AZX611 合金の引張試験を行った結果、継手強さは母材強度とほぼ同等であることを確認しており、そのばらつきも少ないことを認めている。このことから、FSW は TIG アーク溶接よりも継手効率の高い接合が行えると考えられる。

7. おわりに

鉄道車両構体の軽量化を目標として、難燃性マグネシウム合金の車両構体への適用可能性を検証するために、新規の難燃性マグネシウム合金を試作し、金属組織の特徴、機械的性質、加工性について調べた。また、剛性を確保するための中空形材作製の可能性、さらに溶接・接合法を検証した。その結果、適用可能性に対して良好であった。

本研究では、材料技術開発および材料特性に関する検証を行ったが、今後は構造特性について調査を行い、難燃性マグネシウム合金の車両構体への実用性について検証を進める予定である。

参考文献

- 1) 鈴木康文：アルミニウム合金による鉄道車両の軽量化と今後の課題, 軽金属, Vol. 60, No. 11, pp.565-570, 2010
- 2) 秋山 茂, 上野英俊, 坂本 満, 平井寿敏, 北原 晃：難燃性マグネシウム合金の開発, まてりあ, Vol. 39, No.1, pp.72-74, 2000
- 3) 岡村久宣, 青村欣也, 高井英夫, 江角昌邦：摩擦攪拌接合 (FSW) の開発状況と適用上の課題, 溶接学会誌, Vol.72, No.5, pp.436-439, 2003
- 4) 柴柳敏哉：摩擦攪拌接合の材料組織学的描像, 軽金属, Vol.57, No.9, pp.416-423, 2007

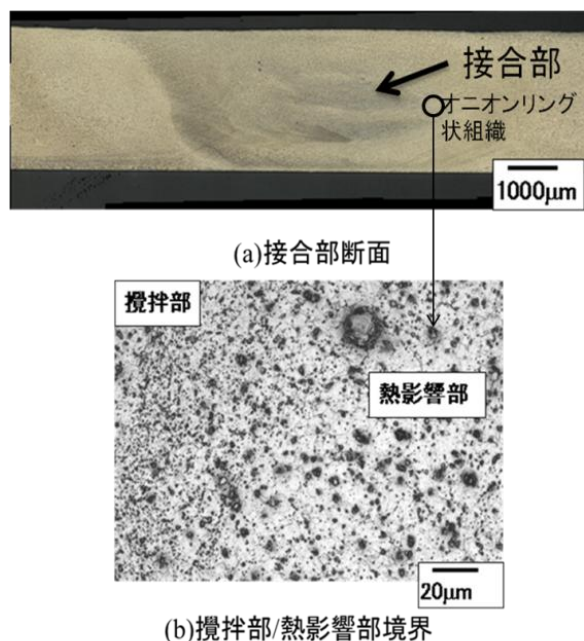


図 5 FSW 接合材の断面観察結果