

氏名	猿渡 直洋
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	医工博甲第299号
学位授与年月日	平成26年9月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
専攻名	情報機能システム工学専攻
学位論文題目	摩擦攪拌プロセスの攪拌効果と温度履歴を利用した熱処理型 アルミニウム合金鋳物の改質
論文審査委員	主査 教授 中山 栄浩 教授 園家 啓嗣 教授 萩原 親作 准教授 吉原 正一郎 准教授 清水 毅 准教授 石田 和義

学位論文内容の要旨

熱処理型アルミニウム合金として広く使用されている AC4CH アルミニウム合金（以降、AC4CH 合金）は、溶湯の流動性や鋳型充填性などの鋳造特性に優れた Al-Si 系を基本合金とし、析出硬化の効果を得るために少量の Mg を添加した代表的な鋳造用合金のひとつである。また不純物元素である Fe の含有量を厳しく制限することにより、韌性を高めている点も特徴のひとつとして挙げられる。本合金は主として、デンドライト状に晶出する初晶 α -Al と、その間隙を埋めるようにネットワーク状に晶出した共晶組織（共晶 α -Al と共晶 Si）、さらには僅かに存在する数種類の金属間化合物から構成され、これらの各相の大きさや形状ならびに分散状態が材料特性に大きな影響を与える。特に、ネットワーク状に不均一に形成される共晶組織は延性を低減する効果を有することが知られているので、本合金の特徴である高韌性化・高延性化を推し進めるためには、ネットワーク状共晶組織の解消（共晶 Si の均一分散）が効果的な方策のひとつに挙げられる。しかしネットワーク状の共晶組織は凝固に伴い平衡状態図に沿い不可避に形成されるので、凝固条件の調整を通じて共晶組織の微細化はある程度実現されるものの、その分散状態を抜本的に改善することは不可能と

言える。他方本合金には、溶体化、急冷および時効処理からなる一連の熱処理（時効析出処理）が施され、初晶および共晶 α -Al 内部に微細な第 2 相析出物を適切に析出させることを通じて高強度化が実現されている。以上の 2 つのマイクロ組織にかかわる特徴を勘案すると、本合金の材料特性や生産効率を更に高めるためには、「ネットワーク状共晶組織の解消（マイクロ組織の均質化）」と「時効析出処理の効率化・最適化」が重要となる。本研究は正にこの点に着目したものであり、近年、アルミニウム合金の新規固相接合技術として脚光を浴びている摩擦攪拌技術の 2 つの効果、具体的には「塑性流動」による共晶組織の均質化と「摩擦発熱」による溶体化処理相当の熱履歴の付与を同時並行的に実現することによる、材料特性の向上を中長期的な目標に掲げている。この目的を実現するためには、いくつかの主要な要素技術にかかわる詳細な検討が必須であり、材料工学的な観点からあらかじめ個別に検討することが重要と言える。以上を勘案して、本研究では、それらの個々の要素技術や現象について、詳細な検討を加えることを主要な目的に据えている。

第 1 章「緒論」では、主として自動車業界におけるアルミニウム合金の現状を概説するとともに、AC4CH アルミニウム合金鋳物の構造（マイクロ組織）を具体的に述べている。またマイクロ組織や熱処理にかかわる問題点、これまでの研究の経緯、さらには本研究で提案する新規プロセスの特徴や有用性などについて、綿密な文献調査に基づいて詳述している。最後に、本研究の目的と論文構成との関連について述べている。

第 2 章「急速昇温を伴う高温短時間溶体化処理が材料特性に及ぼす影響」では、最初に、高周波誘導加熱装置を AC4CH 合金の加熱に適用した際の加熱状況ならびに熱履歴の特徴について検討を加え、温度制御性や適用性に優れた熱履歴の付与が可能であること、さらには最大で $90^{\circ}\text{C}/\text{s}$ にも達する急速加熱が可能であることなどを明らかにした。また、既存の熱処理装置では実現不可能な急速加熱を伴う溶体化処理時の処理温度や処理時間が、マイクロ組織や機械的性質に及ぼす影響について検討を加えた。その結果、極めて初期段階における軽微な変化を含めて、溶体化処理に伴うマイクロ組織の変化を系統的かつ克明に捉えることに成功した。具体的には、①溶体化処理の初期段階において Mg_2Si は容易に消失するものの、Fe 系化合物の消失には更なる時間が必要である。②Fe 系化合物は 2 種類存在し、チャイニーズスクリプト形態を有する Fe 系化合物は比較的短時間の溶体化処理で消失するが、板状の Fe 化合物は長時間の溶体化処理後も残存する。③板状の Fe 系化合物に含まれる Mg は、短時間の溶体化処理で母相中へ固溶する。他方、引張試験の実施を踏まえて、④耐力や引張強さなどの材料強度にかかわる性質は母相中における Mg ならびに Si の固溶量に大きく依存する。⑤破断伸びなどの延性的な性質は、共晶 Si 粒子の大きさや形状さらには分散状態の影響を強く受ける。ことなど、マイクロ組織と材料特性にかかわる種々の新

たな知見を明らかにしている。一連の実験結果は、溶体化処理時のマイクロ組織変化に及ぼす摩擦攪拌時の摩擦発熱の影響を検討する上での、貴重な指針を与えるものと期待される。

第3章「共晶 Si 粒子の分散状態が材料特性に及ぼす影響」では、ネットワーク状の共晶組織の解消に伴う材料特性向上の可能性について実験的に検討している。最初に、ネットワーク状に形成された共晶 Si の存在状態を解消する方法について実験的に検討を加え、代表的な強ひずみ加工法である ECAP の適用により、ネットワーク形態の解消が可能であることを確認し、摩擦攪拌時の塑性流動によるネットワーク形態解消の可能性を示唆した。次に、共晶 Si の分散状態を定量的に評価可能な方法を提案するとともに、実験データに基づいてその妥当性を検証した。くわえて、引張試験を実施し、特に引張試験で得られる伸びと共晶 Si の分散状態について定量的に検討を加えた結果、共晶 Si の均一分散に伴い延性が有意に改善することを明らかにした。また、延性が改善される理由についても、破断面等の観察を通じて材料工学的な視点から詳しく検証している。

第4章「摩擦攪拌プロセス時の摩擦による温度履歴が材料特性に及ぼす影響」では、最初に、摩擦攪拌プロセスに用いる実験装置を新規に設計し、自作した。目標通りの運転性能が得られることを確認するとともに、摩擦時の発熱状況を詳細に観察した。その結果、溶体化処理に相当する熱履歴を、摩擦熱を利用して試料に付与できることを確認した。さらに付与した熱履歴がマイクロ組織や機械的性質に及ぼす影響についても一部検討を加え、本研究で提案する手法の有効性を材料工学的な視点から検証している。

第5章は「結論」で、本研究で得られた成果をまとめるとともに、将来的な展開についても言及している。

論文審査結果の要旨

研究対象である AC4CH 合金は、Al-Si 系を基本合金とし、析出硬化の効果を得るために少量の Mg を添加した代表的な熱処理型 casting アルミニウム合金である。また不純物元素である Fe の含有量を厳しく制限することにより靱性を高めている点も本合金の特徴のひとつである。本合金のマイクロ組織は、デンドライト状に晶出する初晶 α -Al、その間隙を埋めるようにネットワーク状に晶出する共晶組織（共晶 α -Al と共晶 Si）、さらには僅かに存在する数種類の金属間化合物から構成され、これらの各相の大きさや形状ならびに分散状態が材料特性に大きな影響を与えることが知られている。特に、ネットワーク状に不均一に形成される共晶組織は、延性を低減する効果を有することが知られているので、本合金の特

徴である高靱性化や高延性化を推進するためには共晶組織の均一分散化が効果的な方策のひとつに挙げられている。しかしネットワーク状の共晶組織は、平衡状態図に準じて凝固時に不可避に形成されるので、凝固条件の調整を通じて共晶組織の分散状態を改善することは原理的にも困難を極める。一方、本系合金には、溶体化、急冷および時効処理からなる一連の熱処理（時効析出処理）が施され、初晶および共晶 α -Al 内部に微細な第2相析出物（主として、 Mg_2Si 相の前駆体）を適切に析出させることを通じて高強度化が実現されている。以上に述べた状況から、本合金の材料特性や生産効率を更に高めるためには、「共晶組織の均一化」と「時効析出処理の効率化・最適化」が重要なポイントとなる。本研究は正にこの点に着目したものであり、「共晶組織の均一化」と「時効析出処理の効率化」を研究の2つの柱に掲げ、またそれら2つの同時並行的な実現を将来的な目標に据えている。本研究の独創的なアイデアとして、「共晶組織の均一化」は「塑性流動」、「時効析出処理の効率化」は「摩擦発熱」の利用により達成しようという点を挙げるができる。これは近年、新規固相接合技術として脚光を浴びている摩擦攪拌接合技術にヒントを得ており、摩擦攪拌時における「塑性流動」と「摩擦発熱」を利用して、共晶組織の均一化と微細化（マイクロ組織の改良）、ならびに溶体化処理に相当する熱履歴の付与（時効析出処理の効率化）を同時並行的に実現しようとしている。しかしこの技術を完成するためには、いくつかの基礎技術の構築・検証が必須であり、これらの基礎技術について材料工学的な観点から系統的に研究することが本研究の主目的である。

本研究で得られた研究成果を例示すると、「塑性流動」にかかわる研究成果として、①共晶組織の分散状態を定量的に評価可能な方法を提示した。②代表的な強ひずみ加工法のひとつである ECAP 法を用いると、ネットワーク状の共晶組織を均一分散することが可能であることを明示した。③ネットワーク状共晶組織の解消に伴い、引張試験における延性が有意に向上することを確認した。「摩擦発熱」にかかわる成果として、①高周波誘導加熱装置を AC4CH 合金の加熱に用いると、摩擦発熱時の昇温速度に相当する大きな昇温速度（例えば $90^{\circ}C/s$ ）で試料を加熱することが可能である。② 0.9 から $90^{\circ}C/s$ の範囲内で溶体化処理時の昇温速度を調整すると、マイクロ組織と引張特性には昇温速度に依存する有意な変化が認められる。③3分以下の極めて短時間の溶体化処理によっても、Fe 系金属間化合物の存在状態に代表される軽微なマイクロ組織変化を良好な再現性で実現可能である。その他、学術的および工業的に貴重な多数の現象を明らかにしており、また今後の発展も多いに期待できる数々の知見を得ている。

以上の研究成果ならびに提出された研究論文について、論文審査委員会で協議した結果、審査委員全員の総意により、本論文は博士論文（工学）に相応しいと認定した。