

報告番号	乙 第 7432 号
------	------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **アルミニウム合金の高温での界面現象を利用した高機能材料の創製
(Development of High-performance Materials Using Interfacial Phenomena of Aluminum alloys at High temperatures)**

氏 名 古川 雄一

論 文 内 容 の 要 旨

温室効果ガス(GHG : Greenhouse Gas)の排出量は、各種製品の価値指標となり、製品設計にライフサイクルアセスメント (LCA) の視点が盛り込まれるようになった。LCA は、ある製品とサービスのライフサイクル全体 (資源採取、原料生産、製品生産、流通、消費、廃棄、リサイクル)、または、その特定段階における環境負荷(CO₂、NO_x、SO_x 等)を定量的に評価する手法であり、ISO14040(JIS Q14040)に枠組みが示されている。環境に影響を及ぼす全ての影響に関する最適解を導くことが求められている。特に、素形材分野においては、材料や工法の選定により、ライフサイクル全体へ影響を及ぼすため、環境負荷軽減を率先して行かなければならないと考えている。2019年3月に欧州において自動車のLCA規制の検討が開始されたことを機会に、近年、LCA への注目度が高まっている。本研究は、各種素形材の中から、アルミニウム合金に着目し、LCA 視点による GHG の排出量を低減するためのアイテムを検討した。その結果、GHG 低減に向け 2 つの視点で研究を行うこととした (第 1 章に記述)。

第 1 の視点としては、既に再生材の活用が一般的になっており、且つ、LCA 視点における材料や製造に関する CO₂ の排出量が少ない、ADC12 ダイカストの更なる省エネルギー化について研究を行った。ボリュームゾーンである ADC12 ダイカストを低い湯温、低い鑄造圧力で生産するために金型表面と ADC12 溶湯の濡れに着目した研究を行った (第 2 章)。また、ダイカストの際の鑄造圧力と溶湯からの熱を有効活用するため、金型表面の物性を活

用した金型表面の軟窒化および炭化をインプロセスで行う方法の研究を行い、金型の劣化防止や再熱処理による CO₂ 排出量の増加の低減について検討した（第 3 章）。また、ADC12 ダイカストの熱、圧力に加え、ADC12 に主成分として含まれるケイ素に着目した炭素との複合化に関する研究を行い、近年自動車における電動化用の各種部品で求められる部分的な高熱伝導化に向けた部分複合化の研究を行った（第 4 章）。

第 2 の視点として、CO₂ 排出量の原単位が多い、新地金の比率が多い製品に対し、一度使用して再生される再生地金の活用により材料 CO₂ 排出量原単位の低減を促進する研究を行った。展伸材の成形において、従来のビレットからではなく、溶湯から直接的に表面張力と空冷で成形する金型を用いない型レス鋳造法の研究を行った（第 5 章）。また、再生材の使用が得意な鋳物の中で、新地金の比率が高い製品において、再生材に含まれる鉄を無害化する方法についての研究を行った（第 6 章）。

2 つの視点からの研究の共通点は、アルミニウム合金の溶解から凝固に至るプロセスにおける熱エネルギーの有効活用である。一度の溶解エネルギーを大切に扱い、丁寧に凝固させ、凝固直後の温度領域においても高付加価値な析出物を出現させる。また、特別な添加物を付与せずに、濡れの悪い材料を複合化することで、リサイクル性の良い部分複合化した高機能材料を創出することが可能になる。本研究は、アルミニウム合金溶湯が凝固する過程における溶湯表面と金型や被複合材等の異種材料との界面における濡れや反応と凝固時の温度履歴の制御による省エネルギーで高機能材を生産するための研究である。各章についての要約を示す。

第 1 章では、本研究の背景と課題を明らかにするとともに、目的ならびに意義を述べた。

第 2 章は、アルミニウム合金溶湯とダイカスト金型表面の濡れの制御による生産性の向上と製品の高機能化の研究を示す。一般的な離型剤を用いて、湯流れ時は溶湯温度を下げず、圧力付与時にはキャビティ全体の溶湯へ圧力が効率よく伝播し、その後、溶湯が急速凝固する断熱と伝熱を両立する金型表面の実現を目指し繊維状カーボンとフラーレンの組み合わせの表面処理を施し、その後、アモルファスカーボンに変化する被膜（ナノカーボンハイブリッド被膜）を創出した。この被膜の活用により、品質不良低減に繋がり、部品製造時の CO₂ 排出量の低減が可能となった。

第 3 章は、アルミニウム合金ダイカスト環境下における炭素や窒素の高温分解を活用した金型表面の炭化および窒化による高機能化の研究を示す。アルミニウム合金ダイカストの金型は溶損およびヒートクラック等の損耗が激しい。本研究において金型表面の物性、温度、圧力の環境を整えることで、金型を保護する条件があることを見出した。金型の使用環境下で金型寿命を向上する使い方をすることで、金型製作時の CO₂ 排出量低減、金型不具合低減による製品良品率向上や可動率向上、金型修理の低減による生産時の CO₂ 排出量低減を支えることが可能となる。ダイカスト金型表面の自己修復を実現可能とするため、ダイカスト環境下におけるインプロセス軟窒化および炭化の基礎検討を行った。

第 4 章は、アルミニウム合金中の化学反応を活用した部分複合化による高機能化の研究を行った。必要最小限の部分を高機能化するために部分複合化検討を行い、リサイクル性や

軽量特性を考慮し、アルミニウム合金材料と炭素の複合化について研究を行った。鋳造用の合金成分として主流であるケイ素に着目し、複合界面に SiC を形成する条件を熱力学計算と濡れの考察により明らかにした。アルミニウムへのケイ素含有および溶湯温度がアルミニウム/炭素繊維および Al-Si 合金/炭素繊維間の濡れや界面反応に及ぼす影響を分析と熱力学計算により調査した。

第 5 章は、アルミニウム合金溶湯の表面張力と凝固計算を活用した型レス鋳造法による高機能製品の作製の研究を行った。材料の選択肢の拡大による材料製造時の CO₂ 排出原単位の低減と型レスによる製品製造時の CO₂ 排出量低減、他の工法では作ることができない中空長尺複雑形状の高機能化による製品使用時の CO₂ 排出量低減などライフサイクル全体に寄与する工法の検証を行い、溶湯を上げながら形状を付与して成形する型レス鋳造法の発案し、材料選択や製品形状の自由度を拡張させることによる部品の高機能化についての研究を行った。その結果、一般的には鋳造が困難とされる展伸材による部品作製が可能であることを確認した。また、形状自由度を活かし、自動車部品の骨格部分の高機能化やクラッシュボックスの高機能化に関する研究を行った。

第 6 章は、アルミニウム合金への鉄分混入を許容する Al₁₅Si₂(Fe, Mn)₄ の高温析出による材料製造時の CO₂ 原単位の低減と熱処理レス化の研究を行った。新地金比率が高い、AC2B や自動車ボデー用の高延性材について、再生材使用率を向上するために、再生材に含まれる不純物元素の代表例である鉄の混入の無害化を検討した。熱力学計算により、鋳造後の高温領域で鉄を含む塊状の Al₁₅Si₂(Fe, Mn)₄ を析出させることにより、鉄の懸念である伸びの減少や自然時効の影響を無害化できることを確認した。最初に AC2B における 400 °C 以上の高温領域での Al-Si-Fe-Mn 系の析出物について見出され、その後の高延性材料のアルミニウム合金ダイカストの応用研究で、同様の結果が得られ、高延性ダイカスト材料における鉄の許容量の拡張の可能性を確認した。

第 7 章において、本論文の全体を総括し、得られた成果に関する結論ならびに今後の課題について述べた。