

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論文題目

自動車の摺動部品における過共晶Al-Si系合金の摩擦摩耗特性
に関する研究

A study on tribological properties of hyper-eutectic Al-Si alloys for
applying to automobile sliding parts

申請者

塩田 正彦

Masahiko SHIODA

2022年2月

カーボンニュートラル実現のために、自動車の軽量化をさらに進め、燃料消費率、電気消費率を向上させることが強く望まれている。本論文では、軽量化による走行抵抗の低減に加え、摩擦損失の低減によるエンジンやトランスミッションの効率向上によっても燃費向上に貢献する、摺動部品のアルミニウム化を実現させるために、アルミニウム合金と摺動相手材の潤滑摩耗メカニズムと摩擦摩耗特性を満足する摺動面の形態を究明するとともに、必要な耐摩耗性、耐焼付き性を確保するための材料仕様を明らかにし、実験的検証を行っている。

1. 審査経緯

2021年9月28日	予備審査会
2021年9月30日	教室受理決定
2021年10月21日	創造理工学研究科運営委員会受理決定
2021年11月17日	論文案修正版を主査および副査へ提出，または送付
2021年12月22日	公聴会
2022年1月25日	論文案修正版を主査および副査へ提出，または送付
2022年2月8日	審査分科会

以上の審査に加えて、下記のとおり個別の対面審査を実施した。申請者が審査員に各章の説明を行い、審査員が質疑する形で進められた。

(1) 宮下朋之教授による対面審査

10月19日（火）

まず、9月28日の予備審査会で指摘を受けた、熱力学計算の詳細と合金開発の詳細について説明し、了承を得た。次に、第7章の開発合金の合金元素と化学組成を決定した理由を具体的に書くよう指摘を受けた。その後、内容を追加し、了承を得た。

(2) 石村康生教授による対面審査

11月1日（月）

まず、9月28日の予備審査会で指摘を受けた、摩耗メカニズムの一般化、従来研究と本研究の違いの具体化について説明し、了承を得た。次に、第6章において、材料によって切削抵抗が異なる理由が不明確であること、第7章において、当該部品が使用される温度での特性も書くべきとの指摘を受けた。その後、内容を追加・修正し、了承を得た。

(3) 岡根利光客員教授、神戸洋史客員上級研究員による対面審査

11月25日（木）

摩耗メカニズムの説明のために使用した模式図における、摺動面の粗さと初晶けい素の形状を実部品、試験片の粗さと形状に近づけて考察するよう指摘を受けた。また試験片の摩耗面の観察位置を明確に示すよう指摘を受けた。その後、内容を追加・修正し、了承を得た。

研究倫理については受理前に申請者が研究倫理概論を受講するとともに、論文の剽窃・盗用チェックを実施して、問題のないことを確認した。

2. 論文の背景, 内容, 評価

以上の審査を経た本論文は, 全 8 章から構成されている. 以下に各章の概要と審査結果を述べる.

第 1 章は緒言で, 自動車部品の軽量化による燃料消費率, 電気消費率向上効果を説明し, 他部品より軽量化による燃費改善効果が大きい摺動部品のアルミニウム化が望まれていることを述べている.

第 2 章では, まず摺動部品へのアルミニウム合金の適用の歴史と従来研究のレビューを行っている. その結果, 従来の研究開発においては, 潤滑油が供給されアブレシブ摩耗が主体となる摺動条件下において, 過共晶 Al-Si 系合金をシビア摩耗からマイルド摩耗に遷移させる方法, および自動車部品に必要な耐摩耗性, 耐焼付き性を満足させる条件が解明されていないことを示し, 摺動部品のアルミニウム化を拡大するために, これらを明らかにすることを本研究の目的としている.

第 3 章では, 過共晶 Al-Si 系合金の摺動相手材が鋼材である場合の摩耗メカニズムを明らかにしている. 自動車の潤滑環境下においては, 同合金の摩耗形態がアブレシブ摩耗となり, 合金中の初晶けい素をマトリクスから突出させた摺動面にすることで, シビア摩耗からマイルド摩耗に遷移し, 必要な耐摩耗性が得られることを示している. また, 初晶けい素を突出させた摺動面を形成, 維持するためには, 初晶けい素の平均粒径と面積率を大きくする必要があり, 突出させるために必要な粒径と面積率は摺動面圧の増加とともに大きくなることを示している. さらに, 初晶けい素の粒径を大きくするための製造条件を明らかにしている.

第 4 章では, 過共晶 Al-Si 系合金の摺動相手材が炭素繊維強化樹脂 (CFRP) である場合に, CFRP の摩耗が問題となることを説明し, その原因として初晶けい素による樹脂マトリクスのアブレシブ摩耗が進んで炭素繊維が脱落するため, 摩耗量が増加することを明らかにしている. この過共晶 Al-Si 系合金の相手攻撃性を低減するために, 同合金中の粗大な初晶けい素の分散を抑えた新合金を提案し, その効果を実験で明らかにしている.

第 5 章では, 過共晶 Al-Si 系合金製シリンダーボアとピストンリングの摺動メカニズムと, 摩擦摩耗特性を満足する摺動面の形態を究明している. その結果より, 過共晶 Al-Si 系合金から突出させた初晶 Si 粒とピストンリング表面のニッケルめっきから突出させた窒化けい素粒子との摺動とすることによって, 両方の凸部で荷重を支え, かつ凹部が油溜まりとなり, 必要な耐焼付き性と耐摩耗性が得られることを明らかにしている.

第 6 章では, 過共晶 Al-Si 系合金切削時の超硬工具の摩耗メカニズムと工具摩耗面の形態を究明し, 過共晶 Al-Si 系合金中の粗大な初晶けい素が工具をアブレシブ摩耗させていることを明らかにしている. そして, 第 4 章で提案した, 粗大な初晶けい素の分散の抑制が工具寿命を延ばすためにも有効であることを明らかにしている.

第 7 章では, 今後さらに摺動部品のアルミニウム化を進めていくためには, ヤング率を向上させ, 線膨張係数を低減させた合金が必要であることを説明し, 過共晶 Al-Si 系合金のけい素量と遷移金属元素量を増加させることにより両特性が向上することを明らかにしている. この成果に基づいて, 自動車のラダーフレームに必要なヤング率と線膨張係数を有するアルミニウム合金の仕様を提案し, その効果を実験で明らかにしている.

第8章では、以上の知見を総括し、本研究で明らかにしたアルミニウム合金の摩耗メカニズムと摩擦摩耗特性を確保するための諸因子が解明されたことで、自動車のアルミニウム合金製摺動部品の材料仕様、部品仕様、製造方法と製造条件を決定する上での指針が得られ、同部品の車載が進んでいることを述べている。

以上、本論文は、過共晶 Al-Si 系合金、および CFRP、粒子分散めっき等を自動車の摺動部品に適用する場合は硬質相をマトリクスから突出させた摺動面を形成させることでマイルド摩耗に遷移し、その後もその摺動面を維持させることで必要な耐摩耗性と耐焼付き性が得られるという、従来の研究で示されたシビア・マイルド摩耗遷移とは異なるメカニズムを示し、それを実験的に検証したものである。また必要な耐摩耗性と耐焼付き性を得るための材料因子についても明らかにしている。以上の結果は、自動車業界において、新たなアルミニウム合金の研究・開発、部品設計、量産工法と量産条件の決定に活用され、多くの摺動部品のアルミニウム化が実現している。また本論文の成果により、EVを含めた次世代自動車の摺動部品のアルミニウム化、およびカーボンフリーのバイオ潤滑剤に適合した摺動材料の開発においても基本的な指針を与えることができると考えられる。よって博士（工学）として価値のある論文であることをここに認める。

2022 年 2 月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 吉田 誠

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 宮下 朋之

早稲田大学教授 博士（工学）東京大学 石村 康生

早稲田大学客員教授 博士（工学）東京大学 岡根 利光

早稲田大学客員上級研究員 工学博士 早稲田大学 神戸 洋史
