

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博 士 論 文 概 要

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

2021年10月

第 1 章 本研究の社会的背景

現在、自動車会社の最大の課題は二酸化炭素（CO₂）排出量の削減による中長期的な地球環境の保全であり、自動車の燃費をさらに向上させていく必要がある。これまでに、燃費向上策の 1 つである自動車の軽量化のためにアルミニウムが果たした役割は大きく、1970 年代後半からアルミニウム合金を適用した自動車部品の点数も合金の使用量も確実に増加してきた。今後は、アルミニウム合金の部品適用を拡大して軽量化を進めるとともに、摩擦力低減等の燃費向上技術の研究開発も進めて、CO₂ 排出量をさらに削減していく必要があることがわかった。

第 2 章 従来の研究と本研究の目的

本研究では、従来の研究例が少なく、実用化に至っていない摺動部品を研究の対象とした。本研究の目的を以下に示す。

- (1) 自動車の摺動部品に適用可能なコストの過共晶 Al-Si 系合金を開発する。
- (2) 自動車の各摺動部品に必要な耐摩耗性、耐焼付性を確保するための、過共晶 Al-Si 系合金の仕様を明らかにする。
- (3) (2) の仕様を得るための合金組成、製造条件を明らかにする。

第 3 章 過共晶 Al-Si 系合金の潤滑下の摩耗に及ぼす初晶けい素の粒径と面積率の影響

第 3 章ではトランスミッション部品に使用される鋼材と過共晶 Al-Si 系合金との摺動を研究の対象とした。

自動車の摺動部品の多くは摩耗の許容量が少ないため、摩耗量が時間や距離とともに直線的に増加するような材料は使用できず、シビア摩耗（初期摩耗）からマイルド摩耗（定常摩耗）に遷移させるように材料の選定と部品の設計を行う。この摩耗遷移について、従来の研究では、機械加工によって生じた凹凸、うねりなどが、初期摩耗の進行とともに減少し、真実接触面積が増加して面圧が下がる、いわゆる「なじみ（runnig-in）」によって起こると報告されていた。これに対し過共晶 Al-Si 系合金の場合は、摺動面を平滑にせず、硬い初晶けい素をアルミニウムのマトリクスから突出させた方がマイルド摩耗に遷移しやすいことが本研究で明らかになった。またこの場合は、初晶けい素の面積率と平均粒径が大きいほど、摩耗量が少なくなることを摩耗試験にて確認した。また、面圧が高くなると、必要とする耐摩耗性を得るための初晶けい素の平均粒径と面積率が大きくなった。

さらに本章では、必要な初晶けい素の平均粒径と面積率が得るための、鑄造方法、鑄造条件を明らかにした。以上の成果を用いてトランスミッションのシフト

フォーク，オイルポンプハウジング，ミッションカバーなどをアルミ化した．

第4章 Al-Si系合金の耐摩耗性および相手攻撃性に及ぼすSi粒径の影響

第3章の研究により，トランスミッションの摺動部品への過共晶Al-Si系合金適用を進めることができた．しかし，炭素繊維強化樹脂（CFRP）のようにマトリクスの硬さが過共晶Al-Si系合金中の初晶けい素の硬さより低い材料が摺動相手となった場合は，相手攻撃性（相手材の摩耗量）が問題となることがあった．そこで本章では，自動変速機における過共晶Al-Si系合金ダイカストとCFRP製シールリング材の摺動を研究の対象とした

まず，CFRPの摩耗形態を調査したところ，ある幅を超えたアブレイブ摩耗痕が樹脂マトリクスに見られ，過共晶Al-Si系合金中の比較的粗い初晶けい素が摩耗の原因と考えた．よって本章では，初晶けい素の粒度分布を重要因子とし，これが摺動相手材の摩耗量に及ぼす影響を調査した．

次に，従来の過共晶Al-Si系合金では粗い初晶けい素の晶出を抑えることが困難であったため，粒径 $14\mu\text{m}$ 以上の初晶けい素量の晶出を抑えた新たなAl-Si系合金を開発した．そして，この新合金を適用すると，従来の過共晶Al-Si系合金に比べ自身の摩耗，摺動相手材の摩耗共に少なくなることを確認した．新合金とCFRPとの摺動においては，初期摩耗の段階で，アルミニウム合金の初晶けい素および樹脂中の炭素繊維が突出し，この状態が定常摩耗に遷移した後も維持されていることによって摩耗量が少なることを明らかにした．この新合金も自動車部品に適用し，現在は新部品への適用拡大を進めている．

第5章 過共晶Al-Si系合金の摩耗，焼付きに及ぼす摺動相手材の影響

第5章では，過共晶Al-Si系合金製ライナレスシリンダーブロックとピストンリングの摺動を研究の対象とした．

過共晶Al-Si系合金製シリンダーは米独で実用化されているが，いずれも17%以上のけい素を含む比較的高価な材料を使用し，日本におけるブロックの量産工法であるダイカストとは異なる鑄造方法で生産されている．これに対し，本研究では，従来材よりけい素量の少ない比較的安価な開発合金のダイカストでシリンダーブロックに必要な耐摩耗性，耐焼付き性を満足させることを目標にした．

ただし，この目標達成を，第3，4章で研究したようなアルミニウム合金の仕様検討のみで達成するのは困難なため，ピストンリング上のめっき材質，およびその表面粗さを重要因子として，これらが摩耗，焼付きに及ぼす影響を調査した．

その結果，ピストンリング上のめっきを従来のクロムめっきから窒化けい素粒子分散Ni-P-Coめっきにし，さらに窒化珪素粒子を微細化することで，Si量15.6%の過共晶Al-Si系合金ダイカストでもSi量17%の鑄造材A390と同等の耐焼付き性が得られた．またピストンリング上のめっきの表面粗さを小さくすると，過共晶

Al-Si系合金の摩耗量が減少することも明らかにした。過共晶Al-Si系合金の初晶Si粒がマトリクスから突出，またNi-P-Coめっきの摺動面は窒化けい素粒子がマトリクスから突出するため，両方の凸部が荷重を支え，かつ凹部が油溜まりとなることで良好な潤滑状態が保たれると考えた。本研究の成果を用いたエンジンを試作して各種耐久，性能評価をし，シリンダボア温度低減による耐ノッキング性向上効果なども確認できた。

第6章 Al-Si系合金ダイカストの超硬工具切削における工具摩耗と摩耗機構

過共晶Al-Si系合金製摺動部品の適用が進まない原因の一つに機械加工時の工具摩耗が激しく，部品製造コストが高くなるという問題があった。

この問題に対し，第4章で研究した過共晶Al-Si系合金中の初晶けい素の粒度分布の改善は工具摩耗低減にも効果があると考えた。

Al-Si系合金ダイカストを超硬工具で切削した場合の工具摩耗量を調査した結果，粒径 $14\mu\text{m}$ 以上の初晶けい素の晶出を抑えた新合金は，切削抵抗，工具摩耗量ともに共晶合金ADC12と同程度まで向上することを明らかにした。

第7章 ダイカスト用高ヤング率・低線膨張係数アルミニウム合金の開発

第3章～第6章の研究により摺動部品のアルミニウム化がさらに進んだ。一方で，摩擦摩耗特性を満足しても，ヤング率と線膨張係数が不十分なため，アルミニウム化を断念した部品があった。

そこで本研究では，まずエンジンのラダーフレームへの適用を前提に，ヤング率 90GPa 以上，線膨張係数 $18.0\times 10^{-6}/\text{K}$ 以下を目標とし，Al-Si-Ni-Fe-Mn-Cu系合金を開発した。この合金はけい素量は約16%以下に抑え，Ni，Fe，Mnなどの遷移金属元素を加えることに，Al-(Fe,Mn)-Si，Al-Niなどのヤング率の高い金属間化合物相を分散させたことを特徴としている。

次に，この合金の合金元素総添加量とヤング率が線形関係を示し，総添加量を18.2at%以上とすればヤング率が 90GPa 以上となることを明らかにした。また，合金元素総添加量と線膨張係数も線形関係を示し，総添加量を20.4at%以上とすれば線膨張係数が $18.0\times 10^{-6}/\text{K}$ 以下となることを明らかにした。この新合金を商品化し，現在は部品化に向けた適用技術開発を進めている。

第8章 総括

第8章では各章の研究で得られた結果と研究成果の適用状況をまとめた。

第3章～第7章で研究した過共晶Al-Si系合金，同合金を使用した摺動部材の現在の生産，販売量は月500トン（インゴット換算）を超えている。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 塩田 正彦

印

(2022年 1月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
1. 論文	<p>○ 1)塩田正彦, 織田和宏, 惣田裕司, 小林郁夫, 岸本幸宏: ダイカスト用高ヤング率・低線膨張係数アルミニウム合金の開発, 鑄造工学, 93(2021), 194.</p> <p>○ 2) <u>MASAHIKO SHIODA</u>, T.MOCHIZUKI, Y.KISHIMOYO : Tool Wear and Wear Mechanism of Carbide Tool in Cutting Al-Si Alloy Diecastings, Materials Transactions, 62(2021), 526.</p> <p>○ 3)塩田正彦, 望月龍彦, 岸本幸宏 : Al-Si系合金ダイカストの超硬工具切削における工具摩耗と摩耗機構, 軽金属, 69(2019),174. <論文2)と3)は学会間の連携により同内容></p> <p>○ 4)塩田正彦, 望月龍彦: Al-Si系合金の耐摩耗性および相手攻撃性に及ぼすSi粒径の影響, 軽金属, 68(2018),304.</p> <p>○ 5)塩田正彦, 馬淵豊: 過共晶Al-Si系合金の潤滑下の摩耗に及ぼす初晶Siの粒径と面積率の影響, 軽金属, 67(2017),72.</p> <p>6)M.YABUSHITA, T.GODA, Y.ONO, H.TEZUKA, T.SATO, K.ODA, <u>M.SHIODA</u> : Evaluation of Young's modulus of high stiffness aluminium die cast alloys using nanoindentation technique International Journal of Cast Metals Research, 21(2008),180.</p> <p>○ 7)甲藤晴康, 橋本暁生, 北岡山治, 鞆師守, 塩田正彦: P添加過共晶Al-Si合金の初晶Si微細化の限界温度, 軽金属, 52(2002),18.</p> <p>8)K. TSUSHIMA, M.SAYASHI, <u>M.SHIODA</u>, S.KITAOKA, A.HASHIMOTO, H.KATTOH : Development of a Wear Resistant Aluminum Alloy for Automotive Components, SAEpaper,1999-01-0350(1999).</p> <p>9)近藤巖, 松室昭仁, 妹尾允史, 岡田健三, 塩田正彦: Al-Fe合金の高圧力状態図と弾性係数の変化, 機械学会論文集A, 60(1994),1551.</p> <p>10)<u>M.SHIODA</u>, M.ARITA, A.MATSUYAMA, K.OKAWA, T.SAKAI The development of high performance Al-Pb bearing P/M alloys, Adv. Powder Metall (1990), No.2,51.</p>
2. 総説	<p>1)塩田正彦, 馬淵豊, 吉田誠, 神戸洋史:摺動部品用材料の潤滑摩耗試験方法, 鑄造工学, 94(2022), (2月号掲載決定)</p> <p>○ 2)塩田正彦, 吉田誠, 神戸洋史:自動車の摺動部品への過共晶Al-Si系鑄造合金適用の歴史, 鑄造工学, 94(2022), 26.</p> <p>○ 3)塩田正彦: 自動車用鑄物およびダイカスト用アルミニウム合金の開発動向, 軽金属, 55(2005),524.</p> <p>4)塩田正彦:自動車における省エネルギーとアルミ部品, アルミプロダクツ, 11(1998), 9.</p> <p>5)塩田正彦:耐摩耗アルミダイカスト合金の開発, アルトピア, 27(1997),No.5,9.</p> <p>6)塩田正彦:自動車用ターボチャージャーとその軽量化技術, 軽金属, 47(1997), 702.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 塩田 正彦

印

(2022年 1月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
3. 講演	<p>1) 下野翔太, 手塚裕康, 小林郁夫, 里達雄, 織田和宏, <u>塩田正彦</u>, 鹿毛秀彦: 超音波パルス法による高剛性ダイカスト材のヤング率評価, 第157回鑄造工学会全国講演大会(2010), 131.</p> <p>2) 藪下雅崇, 合田知男, 手塚裕康, 里達雄, 織田和宏, <u>塩田正彦</u> 過共晶Al-Si系合金ダイカスト材の微細組織とそのヤング率評価, 第150回鑄造工学会全国講演大会(2007), 57.</p> <p>3) 合田知男, 藪下雅崇, 手塚裕康, 里達雄, 織田和宏, <u>塩田正彦</u> : 過共晶Al-Si合金ダイカストの組織とナノインデンテーション法によるヤング率の評価 日本鑄造工学会149回全国講演大会概要集 (2006), 55.</p> <p>4) 合田知男, 手塚裕康, 里達雄, 織田和宏, <u>塩田正彦</u> : Al-Si合金ダイカスト材のナノインデンテーション法によるヤング率の評価 日本鑄造工学会147回全国講演大会概要集 (2005), 17.</p> <p>5) 織田和宏, <u>塩田正彦</u>, 堀川宏, 土田孝之 ダイカスト用アルミニウム合金のヤング率に及ぼすマイクロ組織の影響 105回軽金属学会大会(2005).</p> <p>○ 6) 馬淵豊, <u>塩田正彦</u>, 甲藤晴康, 田村春香: 過共晶Al-Si系合金のシリンダボアへの適用, トライボロジー会議予稿集, (2001), No.10, 109.</p> <p>7) <u>塩田正彦</u>: 耐摩耗アルミニウム合金の摩耗現象 トライボロジー学会 31回自動車のトライボロジー研究会(2001).</p> <p>8) <u>塩田正彦</u>: エンジン軽量化と材料への期待 軽金属学会58回シンポジウム(2000).</p> <p>9) <u>塩田正彦</u>: 自動車用アルミニウム合金の新展開 材料技術研究協会18回セミナー(2000).</p> <p>10) 甲藤晴康, 北岡山治, 鞆師守, <u>塩田正彦</u> : 過共晶Al-Si合金の初晶Si微細化に及ぼすPの挙動の影響, 94回軽金属学会大会(1998).</p> <p>○ 11) <u>塩田正彦</u>, 甲藤晴康: 過共晶Al-Si系合金の潤滑摩耗 91回軽金属学会大会(1996).</p> <p>12) 津島健次, <u>塩田正彦</u>, 鞆師守: Al-15mass%Si-3.5Cu合金の流動限界温度, 126回日本鑄物協会全国講演大会(1995).</p> <p>13) <u>塩田正彦</u>, 有田正司, 松山晃, 大川広衛, 坂井武志, Al-Pb系粉末合金の耐焼き付き性改善, 77回軽金属学会大会(1989).</p> <p>14) <u>塩田正彦</u>, 有田正司, 松山晃, 坂井武志: Al-Pb系粉末合金の機械的性質および耐焼付性に及ぼすSiの影響改善, 74回軽金属学会大会(1988).</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名： 塩田 正彦

印

(2022年 1月 現在)

種類別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
4. 特許	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1)日本軽金属:高剛性、低線膨張係数を有する鋳造用アルミニウム合金 特許第4665413号(登録日:2011.01.21) ○ 2)日本軽金属:耐摩耗性に優れたアルミニウム鋳造合金および同合金を用いた摺動部材 特許第4341438号(登録日:2009.07.17) ○ 3)日産自動車, リケン:摺動部材 特許第3891732号(登録日 2006.12.5) ○ 4)日産自動車, 日本軽金属:アルミニウム合金製摺動部材およびその製造方法 特許第3465774号(登録日:2003.08.29) 5)日産自動車, 日本軽金属:過共晶Al-Si系合金ダイカスト部材およびその製造方法 特許第3416503号(登録日:2003.04.04) 6)日産自動車, 日本軽金属: ダイカスト用過共晶Al-Si合金ならびに過共晶Al-Si合金ダイカスト鋳物およびその使用方法 特許第3389000号(登録日:2003.01.17) 7)日産自動車, 日本軽金属:耐摩耗性に優れたアルミニウム鋳造合金およびその製造方法 特許第3378342号(登録日:2002.12.06) ○ 8)日産自動車:耐摩耗性アルミニウム合金製摺動部材, 特許第3351181号(登録日:2002.09.20) 9)日産自動車, 日本軽金属: 過共晶Al-Si系合金ダイカスト部材の製造方法および過共晶Al-Si系合金ダイカスト部材 特許第3340649号(登録日:2006.08.16) 10)日産自動車, エヌデーシー:アルミニウム軸受合金 特許第2810057号(登録日:1998.05.29) 11)日産自動車, 日本軽金属:耐摩耗性に優れたアルミニウム鋳造合金 特許第2709663号(登録日:1997.10.24) 12)日産自動車, エヌデーシー:アルミニウム軸受合金, 特許第2574274号(登録日:1996.08.08) ○ 13)NIPPON LIGHT METAL: ALUMINUM ALLOY EXCELLENT IN WEAR RESISTANCE AND SLIDING MEMBER USING THIS ALLOY, US 7,695,577 (登録日:2010.04.13) ○ 14)NISSAN MOTOR : BEARING MADE OF ABRASION-RESISTANT ALUMINUM AILOY US 5,912,073 (登録日:1999.01.15) 15)NISSAN MOTOR,NDC : ALUMINUM MATRIX BEARING METAL ALLOY, US 5,104,444 (登録日:1992.04.14) ○ 16)NIPPON LIGHT METAL: ALUMINUM ALLOY FOR CASTING, HAVING HIGH RIGIDITY AND LOW LINEAR EXPANSION COEFFICIENT, EP1728882 (登録日:2013.09.18) 17)NISSAN MOTOR,NDC : ALUMINUM MATRIX BEARING METAL ALLOY, EP 0,353,773 (登録日:1994.10.19)