

氏 名 (本 籍)	陳	振 中	(中華人民共和國)
学 位 の 種 類	博 士	(工学)	
学 位 記 号 番 号	甲 第	1 6 5 号	
学 位 授 与 年 月 日	平 成 1 4 年	3 月 2 5 日	
専 攻	生 産 開 発 シ ス テ ム 工 学 専 攻		
学 位 論 文 題 目	Studies on Fatigue Behaviour of Aluminium Alloys in Automotive Use (自動車用アルミニウム合金の疲労挙動に関する研究)		
学 位 論 文 審 査 委 員	(主 査) 教 授	戸 梶 恵 郎	
	(副 査) 教 授	後 藤 学	教 授 長 谷 川 典 彦

論 文 内 容 の 要 旨

アルミニウム合金 (Al 合金) は高比強度および高比剛性を有するので、これまで構造用材料として航空宇宙分野や輸送分野を中心とする軽量化が要求される機械・構造物に用いられてきた。近年地球規模の環境保全や材料リサイクルなどの観点から、種々の産業分野において Al 合金の応用が積極的に進んでいる。特に自動車産業界では、衝突安全性も考慮して Al 合金の使用が著しく増加しており、今後さらに鋼や鋳鉄製部材の Al 合金部材への置換が進むことが予想される。これに伴って、各種疲労特性の把握と理解が一層強く要求されている。

本論文は、自動車車体構造に採用されている Al 合金のなかから 3 種類の異なるタイプの合金を取りあげ、個々の合金における未解決の疲労挙動と破壊機構について実験的に詳細な検討を行ったものである。

第 1 章は緒論であり、研究の背景、動機および目的を述べている。

第 2 章では、展伸 Al 合金 6063-T5 押出し材の平滑試験片を用いて回転曲げ荷重下で疲労試験を行い、基本的な疲労挙動と破壊機構について検討している。これまで、この合金の疲労特性に関する詳細な研究結果は得られていなかった。6063 合金の疲労強度は 2024 合金や 7075 合金と比べると著しく低く、その $S-N$ 曲線が上方にわずかに凸に湾曲することを確認している。詳細な観察に基づいて、疲労き裂は高応力では粒界、また低応力では粒内で発生する傾向があること、き裂が粒界で発生した試験片は粒内で発生した試験片よりも短寿命となることなどを認め、これらのことが $S-N$ 曲線の形態を誘起していることを明らかにしている。さらに、結晶粒径の異なる材料を用いて付加的な疲労試験を実施し、き裂発生機構が結晶粒径に依存することを確認するとともに、疲労寿命、すなわち $S-N$ 曲線の形態との関連も実証している。最後に、本合金の粒界き裂発生は粒界近傍の組織的要因とともに、比較的粗大な結晶粒径に依るものであることを考察し、疲労特性の改善のためには結晶

粒径の細粒化が不可欠であることを指摘している。

第3章では、鋳造アルミニウム合金 AC4CH の疲労き裂発生および微小き裂成長挙動に及ぼす応力比の影響について検討している。疲労試験結果を応力振幅で整理すると、応力比の増加に伴って疲労強度は低下することを確認し、平均応力（応力比）の影響が修正 Goodman 線図によってほぼ適切か、またはやや安全側に予測できることを明らかにしている。応力比にかかわらず、疲労き裂は鋳造欠陥、または Sb 偏析欠陥から発生し、本合金の場合、後者が支配的な役割を演じることを見出している。Sb 偏析欠陥の存在はこれまで認識されていなかったものであり、共晶 Si 粒子の微細化のための Sb の添加には細心の注意が必要であることを指摘している。有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} を用いて微小き裂成長挙動を整理すると、微小き裂は大きき裂よりも速く、かつ大きき裂の下限界有効応力拡大係数幅 $\Delta K_{\text{eff,th}}$ 以下でも成長し、き裂寸法の増加に伴って成長速度 da/dN は大きき裂の da/dN - ΔK_{eff} 関係に漸近し一致することを認めている。また、このときの ΔK_{eff} 値は $2\sim 3\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、応力比に依存しないことを見出している。詳細な破面解析に基づいて、微小き裂の加速はき裂発生に続くせん断形のき裂成長によるものであり、そのせん断形の成長領域は応力比に強く依存し、応力比の減少に伴って拡大することを明らかにしている。

第4章では、SiC 粒子強化 2024Al 合金 (SiC_p/2024Al) の疲労き裂進展特性に及ぼす粒子径と方位の影響について検討している。応力拡大係数幅 ΔK によってき裂進展挙動が評価されるとき、 da/dN は粒子径の増加に伴って減少する傾向があること、またわずかに方位の影響が存在することを確認している。き裂閉口を考慮すると、異なる粒子径を有する複合材間および方位間の da/dN の相違はほぼ消失することから、き裂経路の屈曲から生ずる破面粗さ誘起き裂閉口が主たる原因であることを明らかにしている。き裂閉口を考慮しても、母材に比べると複合材はなお低い da/dN を示したが、弾性係数の相違も考慮すればその相違はほぼ消失することを確認している。破面解析から、粒子径の大きい場合でさえも、き裂は ΔK にかかわらず母地を優先的に進展する傾向があることを確認している。破面上に現れた粒子の面積率は、一对の破面上でほぼ等しいこと、 ΔK の増加に伴って増加すること、さらに任意断面上で測定された面積率よりも小さいことなどから、粒子径にかかわらずき裂は粒子を避けながら進展する傾向が強いことを明らかにしている。

第5章は結論であり、第2章から第4章の結果を総括している。

論文審査結果の要旨

本論文は、自動車車体構造に採用されているアルミニウム (Al) 合金のなかから3種類の異なるタイプの合金、展伸 Al 合金 6063 押出し材、鋳造 Al 合金 AC4CH、および SiC 粒子強化 2024Al 合金を取りあげ、個々の合金における未解決の疲労挙動と破壊機構について実験的に詳細な検討を行ったものである。

本研究で得られた結果は、対象とした合金の実機への応用が考慮されるとき、耐疲労設計の指針として有用であるばかりでなく、さらなる疲労特性の改善のための合金設計や材料改善、および疲労機構の理解において学術的貢献をなすものであり、

きわめて有意義なものと判断される。

第 1 章は緒論であり、研究の背景、動機および目的を述べている。

第 2 章では、展伸 Al 合金 6063-T5 押出し材の平滑試験片を用いて回転曲げ荷重下で疲労試験を行い、基本的な疲労挙動と破壊機構について検討している。これまでこの合金の疲労特性に関する詳細な研究結果は得られていなかった。6063 合金の疲労強度は 2024 合金や 7075 合金と比べると著しく低く、その $S-N$ 曲線が上方にわずかに凸に湾曲することを確認している。詳細な観察に基づいて、疲労き裂は高応力では粒界、また低応力では粒内で発生する傾向があること、き裂が粒界で発生した試験片は粒内で発生した試験片よりも短寿命となることなどを認め、これらのことが $S-N$ 曲線の形態を誘起していることを明らかにしている。さらに、結晶粒径の異なる材料を用いて付加的な疲労試験を実施し、き裂発生機構が結晶粒径に依存することを確認するとともに、疲労寿命、すなわち $S-N$ 曲線の形態との関連も実証している。最後に、本合金の粒界き裂発生は粒界近傍の組織的要因とともに、比較的粗大な結晶粒径に依るものであることを考察し、疲労特性の改善のためには結晶粒径の細粒化が不可欠であることを指摘している。

第 3 章では、鋳造アルミニウム合金 AC4CH の疲労き裂発生および微小き裂成長挙動に及ぼす応力比の影響について検討している。疲労試験結果を応力振幅で整理すると、応力比の増加に伴って疲労強度は低下することを確認し、平均応力（応力比）の影響が修正 Goodman 線図によってほぼ適切か、またはやや安全側に予測できることを明らかにしている。応力比にかかわらず、疲労き裂は鋳造欠陥、または Sb 偏析欠陥から発生し、本合金の場合、後者が支配的な役割を演じることを見出している。Sb 偏析欠陥の存在はこれまで認識されていなかったものであり、共晶 Si 粒子の微細化のための Sb の添加には細心の注意が必要であることを指摘している。有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} を用いて微小き裂成長挙動を整理すると、微小き裂は大きき裂よりも速く、かつ大きき裂の下限界有効応力拡大係数幅 $\Delta K_{\text{eff,th}}$ 以下でも成長し、き裂寸法の増加に伴って成長速度 da/dN は大きき裂の da/dN - ΔK_{eff} 関係に漸近し一致することを認めている。また、このときの ΔK_{eff} 値は $2\sim 3\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、応力比に依存しないことを見出している。詳細な破面解析に基づいて、微小き裂の加速はき裂発生に続くせん断形のき裂成長によるものであり、そのせん断形の成長領域は応力比に強く依存し、応力比の減少に伴って拡大することを明らかにしている。

第 4 章では、SiC 粒子強化 2024Al 合金 ($\text{SiC}_p/2024\text{Al}$) の疲労き裂進展特性に及ぼす粒子径と方位の影響について検討している。応力拡大係数幅 ΔK によってき裂進展挙動が評価されるとき、 da/dN は粒子径の増加に伴って減少する傾向があること、またわずかに方位の影響が存在することを確認している。き裂閉口を考慮すると、異なる粒子径を有する複合材間および方位間の da/dN の相違はほぼ消失することから、き裂経路の屈曲から生ずる破面粗さ誘起き裂閉口が主たる原因であることを明らかにしている。き裂閉口を考慮しても、母材に比べると複合材はなお低い da/dN を示したが、弾性係数の相違も考慮すればその相違はほぼ消失することを認めている。破面解析から、粒子径の大きい場合でさえも、き裂は ΔK にかかわらず母地を優先的に進展する傾向があることを確認している。破面上に現れた粒子の面積率は、一对の破面上でほぼ等しいこと、 ΔK の増加に伴って増加すること、さら

に任意断面上で測定された面積率よりも小さいことなどから、粒子径にかかわらずき裂は粒子を避けながら進展する傾向が強いことを明らかにしている。

第5章は結論であり、第2章から第4章の結果を総括している。

最終試験結果の要旨

審査委員会は、本論文が学位論文として十分な内容と価値ある知見を含むこと、申請者が専門の分野で学位授与にふさわしい専門知識と語学力を有することを確認し、最終試験に合格と判定した。