

学位論文題名

アルミ合金シリンダーヘッドの材料組織変化を
考慮した耐久性評論に関する研究

学位論文内容の要旨

ディーゼルエンジンは、優れた経済性とエンジン熱効率、頑強さが市場ニーズに合致し、自動車をはじめ、大型船舶、鉄道車両などの輸送手段や発電機械の主要機関として、広く社会に浸透し、今日の社会生活にとって必要不可欠な存在になっている。特に、国内総物流量の 90%を占めるトラックはいたっては、ほぼ 100%がディーゼルエンジンを搭載している。

しかし、現在、ディーゼルエンジンは環境問題の顕在化により、大きな転換期を迎えている。環境問題には、地球温暖化物質(CO_2)と環境汚染物質(NO_x と PM)の 2 つがあり、ディーゼルエンジンでは特に環境汚染物質の排出が問題になる。この問題を解決するため、排気ガス量そのものを低減させることならびに排気ガスの一部を再循環する EGR を使うことが有効である。前者は軽量化による燃費の向上が、後者は EGR による出力低下を防止するための高過給が必要となる。エンジンの軽量化対策として、シリンダーヘッド(以下、ヘッドと略す)のアルミ合金化が挙げられ、既にガソリンエンジンでは一般的に用いられているが、ディーゼルエンジンはガソリンに比べて負荷が大きい上に、上述した高過給により負荷が更に厳しくなるため、アルミ合金化は難しい。

このようにヘッドのアルミ合金化にとって、軽量化と強度耐久性の確保の両立が最も困難な問題であり、アルミ合金化特有の幾つかの技術的課題を解決していかなければならない。開発全体を通しての代表的課題は、①材料設計と寿命評価方法、②軽量化かつ高剛性な構造設計、③材料適正化を図る凝固方向の制御である。

本研究の目的は、上の 3 つの課題を背景として、実際の運転状態を忠実に再現できる構造解析手法の開発と、運転中に起こる材料の非線形挙動にも対応できるように微視的組織変化も考慮した低サイクル疲労評価手法を開発することにある。これらによって、ヘッド開発の初期検討が充実し、事前にヘッドの耐久性をより高精度に評価することが可能になり、開発期間の短縮と開発コスト削減につながる。

本論文は、7 章により構成されている。

第 1 章は、本研究の背景にある社会環境の変化を説明し、参考とすべきこれまで

の研究報告と対比しながら本研究の意義および目的について述べる。

第 2 章では、ヘッド用アルミ合金 AC2B-T6 材を対象に、低サイクル熱疲労試験を実施し、材料の非弾性変形特性や熱疲労特性に与える条件因子依存性を明らかにする。条件因子に選んだのは、全ひずみ振幅、温度範囲、負荷周期、全ひずみ振幅中心位置であり、これらの条件は実機ヘッドの使用状況を考慮して設定する。更に、低サイクル疲労寿命を定量的に予測できる評価指標として塑性ひずみ仕事率密度に着目し、塑性ひずみ振幅や応力振幅などの従来指標との比較を交え、上述した様々な試験条件に対する塑性ひずみ仕事率密度の適用性と工学的有用性を明らかにする。また、温度別クリープ試験を実施し、非弾性変形特性に大きな影響を与えるクリープ特性を把握する。

第 3 章では、アルミ合金 AC2B-T6 材の巨視的な非弾性変形特性と密接な関係がある微視的組織特性に着目し、透過電子顕微鏡(TEM)を用いて析出物サイズや析出物量の微視的組織構造に与える試験条件依存性を明らかにする。更に、析出物が生成されている結晶面を基準に析出物を 2 種類に大別し、微視的組織構造と疲労寿命の関係について詳しく分析する。また、走査電子顕微鏡(SEM)を用いた破面観察も行ない、試験温度による破面様相の変化について検討する。

第 4 章では、開発コスト的にも利点のある材料改質工法として、熱処理条件の最適化に関する実験的検討を行う。供試材に AC2B-T6 材と AC4C-T6 材を選び、T6 熱処理後の追加時効時間の異なる熱処理条件を施し、圧縮と引張の機械的特性に対する雰囲気温度依存性を明らかにすると共に、両材料の特性を比較し、ヘッド材としての適性を評価する。さらに、上述の追加時効処理した AC4C-T6 材を用いて低サイクル熱疲労試験を行い、時効時間が熱疲労特性に及ぼす影響について検討する。更に、微視的組織観察によって、試験前後の組織変化の様子から時効と寿命の関係について考察する。このような一連の検討結果から、試験中の非弾性変形の変化特性を整理し、耐久性効果と生産性を満足する時効条件を提案する。

第 5 章では、実機エンジンの耐久試験におけるアルミヘッド触火面の低サイクル熱き裂現象を再現し、き裂寿命の予測が可能な FEM による高精度な構造解析手法について述べる。すなわち、エンジンの耐久試験を行うと、繰返し負荷によって試験中にアルミ合金の非弾性変形特性が変化するので、その現象を忠実に再現するために、より精巧な有限要素モデルを構築し、弾塑性構成則とクリープ則を連立させて解く。この解析結果と第 2 章で開発した低サイクル疲労寿命評価法を用いて、ヘッドの耐久性評価を行い、現象再現性と寿命予測精度を検証する。

第 6 章では、鑄造基礎試験によって、凝固冷却速度と樹枝状晶の二次枝間距離(DAS)との関係を明らかにする。次に、引張試験ならびに低サイクル疲労試験によって DAS と機械的特性ならびに熱疲労特性の関係を把握する。最後に、実機ヘッドを対象とした鑄造凝固および組織予測解析を行い、実際のヘッドを組織観察し、樹枝状晶の 2 次枝間距離(DAS)とガスによるミクロ的欠陥孔(porosity)に対する組織予測解析の精度検証を行う。そして、凝固速度に違いによって生じる機械的特性の領域別バラツキを考慮した構造解析により低サイクル疲労に対する耐久性評価方法

を提示する．これは，鑄造方法検討のための組織予測解析と設計検討のための構造解析手法を同時並行に行う Concurrent engineering 手法を確立するための第一段階に位置付けられる．

最後の第 7 章は，本研究の総括であり，各章で得られた研究成果をまとめて示す．

学位論文審査の要旨

主査	教授	石川博將
副査	教授	野口徹
副査	教授	但野茂
副査	助教授	佐々木克彦

学位論文題名

アルミ合金シリンダーヘッドの材料組織変化を 考慮した耐久性評論に関する研究

近年、環境問題の顕在化により、ディーゼルエンジンでは特に環境汚染物質の排出が問題になっている。この問題を解決するため、排気ガス量そのものを低減させることならびに排気ガスの一部を再循環する EGR を使うことが有効である。前者は軽量化による燃費の向上が、後者は EGR による出力低下を防止するための高過給が必要となる。エンジンの軽量化対策として、シリンダーヘッドのアルミ合金化が挙げられる。ディーゼルエンジンはガソリンエンジンに比べて負荷が大きい上に、上述した高過給により負荷が更に厳しくなるため、アルミ合金化は難しい。

このようにシリンダーヘッドのアルミ合金化にとって、軽量化と強度耐久性の確保の両立が最も困難な問題であり、アルミ合金化特有の幾つかの技術的課題を解決しなければならない。代表的な課題は、①材料設計と寿命評価方法、②軽量かつ高剛性な構造設計、③ casting 欠陥の抑制と凝固指向性を制御する casting 方法である。

本研究の目的は、上の 3 つの課題を背景として、実際の運転状態を忠実に再現できる構造解析手法の開発と、運転中に起こる材料の非線形挙動にも対応できるように微視的組織変化も考慮した低サイクル疲労評価手法を開発することにある。

シリンダヘッド用アルミ合金 AC2B-T6 材の低サイクル熱疲労試験を実施し、非弾性変形特性や熱疲労特性に与える条件因子依存性を明らかにした。条件因子に選んだのは、全ひずみ振幅、温度範囲、負荷周期、全ひずみ振幅中心位置である。更に、低サイクル疲労寿命を定量的に予測しうる評価指標として、塑性ひずみ仕事率密度が適しており、工学的にも有用であることを明らかにした。また、クリープ試験を実施し、非弾性変形特性に大きな影響を与えるクリープ特性も明らかにした。

ついで、透過電子顕微鏡(TEM)を用いて、アルミ合金 AC2B-T6 材の微視的組織構造に与える試験条件依存性を明らかにした。更に、微視的組織構造と疲労寿命の関係について詳しく分析した。また、走査電子顕微鏡(SEM)を用いた破面観察も行い、試験温度が破面

様相に及ぼす影響について明らかにした。

また、材料改質工法として、熱処理条件の最適化に関する実験的検討を行った。供試材に AC2B-T6 材と AC4C-T6 材を選び、T6 熱処理後、加熱温度と保持時間の異なる追加時効熱処理条件を施し、圧縮と引張の機械的特性に対する雰囲気温度依存性を明らかにすると共に、シリンダーヘッド材として AC4C-T6 材の方が適性が高いことを明らかにした。上述の追加時効処理した AC4C-T6 材を用いて低サイクル熱疲労試験を行い、微視的組織観察によって、試験前後の組織変化の様子から時効と寿命の関係について考察し、強度耐久性効果と生産性を満足する時効条件を提案した。

実機エンジンの耐久試験におけるシリンダーヘッド触火面の低サイクル熱き裂現象を再現し、き裂寿命の予測が可能な FEM による高精度な構造解析を行った。その際、繰返し負荷によって、試験中にアルミ合金の非弾性変形特性が変化する現象を忠実に再現するために、より精巧な有限要素モデルを構築し、弾塑性構成則とクリープ則を連立させて解く新たな手法を提案した。この解析結果と塑性ひずみ仕事率密度を用いた低サイクル疲労寿命評価法により、シリンダーヘッドの強度耐久性評価を行い、現象再現性と寿命予測精度を検証することができた。

鑄造基礎試験によって、凝固冷却速度と樹枝状晶の二次枝間距離(DAS)との関係を明らかにし、ついで、引張試験ならびに低サイクル疲労試験によって DAS と機械的特性ならびに熱疲労特性の関係を明らかにした。最後に、実機シリンダーヘッドを対象とした鑄造凝固および組織予測解析を行い、実際のシリンダーヘッドの組織観察による樹枝状晶の 2 次枝間距離(DAS)とガスによるミクロ的欠陥孔(porosity)の分布に対する解析精度の検証を行った。これに基づいて凝固の方向性によって生じる機械的特性のバラツキを考慮した構造解析により、低サイクル疲労に対する耐久性評価方法を提案した。

これを要するに、著者は、ディーゼルエンジンのアルミ合金シリンダーヘッドに対して、エンジン運転状態を再現できる構造解析手法の開発と、運転中に起こる材料の非線形挙動にも対応できるように微視的組織変化をも考慮した新たな強度耐久性評価手法を提案しており、内燃機関学の進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。