

審査の結果の要旨

氏名 岡 正徳

ディーゼル機関は、実用的な内燃機関の中で最も熱効率がよく、大型化が容易であるなどの優れた特徴があるため、産業界で幅広く活用されている。近年では、環境へのより高い適応の観点からさらなる軽量化・高出力化が進められており、75kW/Litter を超える超高出力機関も登場している。そのため部品設計に求められる技術は高度化を続けており、特に高温度の燃焼ガスによって高い熱負荷が作用するシリンダヘッドでは、信頼性を確保することが困難になっている。ディーゼル機関のシリンダヘッドは、一般にはねずみ鋳鉄で製造される。しかし、ねずみ鋳鉄の力学挙動は複雑であるため、一般的な材料であるにもかかわらず、現在でも疲労強度や疲労き裂の発生・成長に関する研究が続けられている。

このような材料に発生する損傷や破壊を扱う力学体系として、連続体損傷力学（以下では損傷力学と呼称）が知られている。損傷力学は、弾性変形、塑性変形、疲労破壊および破断を含む力学挙動を連続体力学の枠組の中で統一的にモデル化できるほとんど唯一の力学体系であり、期待度は高い。しかし、損傷力学がねずみ鋳鉄に適用された研究例は少なく、特に疲労現象やクリープ現象への適用に関しては限定的である。

このような状況から本論文では、ねずみ鋳鉄に損傷力学を適用し、クリープ挙動を含む構成方程式モデルの構築と検証を実施している。このモデルをディーゼル機関用シリンダヘッドのクリープ疲労寿命評価に適用し、本手法の有効性について検討する。また多くのケースで損傷力学が研究者レベルでしか利用されていないため、広く開発設計の現場で活用されるための提案を行う。本論文は上述の序論（1章）から結論（7章）に至る全7章より成る。

2章では、鋳鉄の特徴と損傷力学に基づく評価モデルについて述べている。ねずみ鋳鉄は、材料内部に晶出している片状黒鉛の影響で、引張側と圧縮側とで力学特性が異なる。また他の鉄鋼材料と異なり、降伏点以下の応力でも損傷が大きく発展する。本論文ではこれらの特徴を考慮しつつ、簡潔性を旨とした弾粘塑性クリープ損傷挙動の構成方程式モデルの定式化を行っている。

3章では、ねずみ鋳鉄の力学特性評価試験について述べている。ねずみ鋳鉄の力学特性を評価するため、静的引張・圧縮試験、ひずみ制御の疲労試験、ノッチ付丸棒の疲労試験、クリープ試験、応力緩和試験およびクリープ疲労試験を

実施している。

4章では、ねずみ鋳鉄の疲労寿命の評価について述べている。本論文では、材料内部の片状黒鉛先端近傍での局所的な損傷発展を簡易的に考慮する **Simplified Two-Scale Model** と、メゾスケールのみ力学挙動から損傷発展を導出する **Mesoscale Model** の2組の損傷力学モデルを同定した。同定には、3章の静的引張・圧縮試験結果と、ひずみ制御による両振り疲労試験結果を用いた。**Simplified Two-Scale Model** は単軸に近い現象には適用可能であるが、応力の近似が粗いため多軸効果が劣っており、モデルの改良が必要であることがわかった。この結果から、本論文では **Mesoscale Model** を用いて弾粘塑性クリープ損傷挙動のモデル化および寿命予測に取り組むことにした。

5章では、ねずみ鋳鉄のクリープ疲労寿命の評価について述べている。4章で同定した弾粘塑性損傷力学モデルを、クリープ損傷変形を考慮した弾粘塑性クリープ損傷力学モデルに拡張した。次にこのモデルを、3章で実施した400°Cにおける静的引張・圧縮試験、クリープ試験、応力緩和試験およびひずみ制御による圧縮片振り疲労試験結果に基づいて同定した。同定の結果は、いずれの試験結果とも良好に対応した。次に同定したモデルを、実際のシリンダヘッドに作用する熱負荷サイクルを模擬したクリープ疲労挙動に適用した。この結果から、破断までの繰返し数だけでなく、クリープを含む弾粘塑性挙動の履歴も良好に予測できることを確認した。

6章では、実機シリンダヘッドのクリープ疲労寿命の評価について述べている。本研究では損傷力学が広く開発設計の現場で活用されることを期待して、上記の損傷力学モデルを汎用商用有限要素コード **ABAQUS** に導入した。実機ディーゼル機関に定格以上の負荷を作用させることによりシリンダヘッドにき裂を発生させた試験を、寿命評価の対象とした。この試験では、3,000回の発進停止サイクルの間に吸気弁間に2種類のき裂が発生した。損傷力学に基づく寿命評価の結果、実機で発生した2種類のき裂と同一箇所にき裂発生を予測できた。また、これらのき裂は実機と同一方向に進展し、本手法の有効性が確認された。

7章は結論である。本論文ではねずみ鋳鉄を対象として、損傷力学に基づく構成方程式モデルの同定と実験的な検証を実施した。また同定したモデルをディーゼル機関用シリンダヘッドの寿命評価に適用した結果、き裂進展速度の評価に課題を残すものの、実機と同様の位置にき裂の発生・進展を予測でき、損傷力学に基づく寿命評価手法の有用性を確認することができた。この過程で、多くの場合に研究者にしか利用されていない損傷力学が広く開発設計の現場で活用されるための具体的な方法を提示した。今後、一層需要が高まるであろう鋳鉄部品の信頼性評価に関し、提案した手法は高い工学的価値を有している。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。