

## 審査の結果の要旨

論文提出者 カシヴィットアンヌイ ジラポン

本論文は “Development and Evaluation of Creep-Fatigue Damage Models for 2 1/4Cr-1Mo Steel in High Vacuum Environment” と題し、10章よりなる。高温構造設計の重要な課題である耐熱金属材料のクリープ疲労相互作用について、従来にないさまざまな条件による実験と走査型電子顕微鏡による破面観察を通じて、クリープ疲労相互作用の現象とその機構を独自の切り口で精密に調査した。また、このような実験により得られた知見に基づき、いくつかの損傷理論について、より精度の高いモデルへの拡張を試みるとともに、理論を比較検討することによって、それぞれの理論の特徴と妥当性を検討した。

第1章は “Introduction” であり、高温機器の損傷評価モデル開発の必要性について述べるとともに、研究の目的と論文の構成を概説している。

第2章 “Background Theory” ではこれまで他の研究者により行われた高温強度およびその評価法に関する研究を調査した結果について述べている。

第3章 “Creep-Fatigue Experiments”, 第4章 “Experimental Results” はクリープ疲労試験の方法と結果について述べたものである。本研究では、2 1/4Cr-1Mo 鋼を用い、550°Cの高温、高真空中における実験を行っている。真空環境は、高温疲労におよぼす大気環境効果を排除するために用いられた。実験条件は、通常のクリープ疲労試験の他、ひずみ波形変動試験、ひずみ速度変動試験、および、切り欠き試験片を用いた疲労試験であり、4種類の異なる実験を通じてクリープ疲労相互作用の多様な側面を明らかにしている。すなわち、真空中では、疲労寿命の周波数依存性が消失すること、低速引張り高速圧縮のようなクリープ疲労負荷の場合には時間・速度依存の著しい寿命の低下が生じること、クリープ疲労損傷は後続の疲労損傷に大きく影響するが逆の場合の影響は大きくないという特徴的な履歴効果があること、ならびに、応力が高いほどクリープと疲労の相互作用は強いことが明らかになった。さらに、以上の実験で得られた破断面を走査型電子顕微鏡で観察することにより、本材料のクリープ疲労相互作用のメカニズムは、クリープキャビティあるいは介在物（インクルージョン）から伝播したマイクロクラックであることが明らかになった。

第5章 “Analysis of Overstress” ではクリープ疲労試験結果に基づいて有効応力が解析されている。本材料の有効応力については、他の研究者より粘塑性理論と整合しない可能性が指摘されていたが、本研究では精密な測定と解析を行うことにより、本材料においても理論との整合性は問題ないことを明らかにしている。

第 6 章以降ではクリープ疲労損傷理論について検討している。まず、第 6 章 “Creep-Fatigue Life Evaluation Based on the Overstress Concept : Linear Damage Model” では有効応力概念に基づく線形損傷理論をとりあげ、この理論では一定ひずみ波形における寿命はよく予測できるものの、負荷履歴効果は記述できないことを明らかにしている。

第 7 章 “Creep-Fatigue Life Evaluation Based on the Overstress Concept : Non-Linear Damage Model” では有効応力概念に基づく非線形損傷理論について検討している。基本的仮定について詳細な検討を行い、損傷の大きさの分布を新たに導入することによって物理的により妥当性のあるモデルへの拡張を試みている。そして、この拡張されたモデルによってすべての実験結果がよい精度で予測されることを示している。

第 8 章 “Creep-Fatigue Life Evaluation : Continuum Damage Mechanics Model” では Lemaitre による連続体損傷力学に基づく損傷モデルが検討されている。本モデルでは、疲労データとクリープデータにより材料定数が決定されるが、通常のクリープデータシートを直接用いるとよい結果が得られないことを指摘している。そして、その原因は高応力下の延性破壊と低応力下の脆性破壊を区別していないこと、通常のデータシートは公称応力を用いていることにあることを明らかにし、これらの問題点を解決することによって、精度の高いモデルを開発している。なお、このモデルではクリープ損傷には環境の影響はないものと仮定されているが、この仮定はよく成立している。

第 9 章 “Discussions” では、本論文で取り上げられた 5 つの損傷モデルについて総合的に考察している。すなわち、有効応力概念に基づく非線形損傷モデルでは本研究で検討した全ての負荷条件に対して非常に精度が高い予測が得られるものの、材料定数の決定などモデルの同定には多くの実験データと複雑な処理が必要であること、一方、損傷力学に基づくモデルでは、上記有効応力モデルよりも精度は劣るものの、モデルの同定に必要なデータは、現在よく用いられている評価法と同じく、疲労試験とクリープ試験のデータであり、取り扱いが容易であることを述べている。さらに、他の材料への適用性、環境効果の導入、実機構造への適用といった面について考察し、特に、損傷力学に基づくモデルについては、従来用いられている時間消費則と延性消耗則との対応関係について検討し、これらの損傷則は損傷力学モデルの特殊な場合として位置付けられることを示している。したがって、現在行われている高温強度評価法の自然な拡張として、損傷力学に基づくモデルが有効であると結論している。

第 10 章 “Conclusions” では以上の成果が要約して述べられている。

以上、要するに、本論文は構造材料のクリープ疲労相互作用の現象とその機構の詳細を実験的に明らかにし、複数の損傷理論を拡張して高精度のモデルを開発するとともにそれらの理論の特徴を比較検討することによって設計応用への重要な知見を得たものであり、機械工学、材料力学の発展に貢献するところが大きい。

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。