

(論文内容の要旨)

本論文は、異材界面が表面と会合する界面端近傍のクリープ変形下における応力場の遷移とその場の強さを明らかにすることを目的に、詳細な数値解析を行ったものであって、6章からなっている。

第1章は緒論であり、き裂や切欠きを有する均質材料では、負荷の瞬間にはその応力集中部（き裂先端近傍または切欠き底近傍）において弾性応力分布が現れるが、クリープの進行とともにその応力場が変化する（小規模クリープSSCから大規模クリープLSCへの遷移）現象を説明した後、本研究の目的と位置付けについて述べている。また、界面端は、一般に弾性変形下において特異な応力分布を有することを述べ、本研究の特徴を説明している。

第2章では、負荷時に強い弾性特異応力場を有する弾性・クリープ2層材料における界面端近傍の小規模クリープから大規模クリープへの応力場遷移について有限要素法解析を行っている。その結果、界面端近傍の応力場は負荷直後よりクリープの進行に伴って顕著な遷移特性を示すことを明らかにするとともに、その挙動の過程について破壊力学概念を基に詳細な検討を行っている。とくに、界面端角度が鋭角の場合を取り上げ、クリープ層と弾性層の界面端形状が異なる材料に対して詳細な考察を実施している。そして、特異応力場遷移は弾性層の界面端形状にはほとんど依存せず、クリープ層の変形によってもたらされることを見出している。また、その遷移中および大規模クリープ到達後の定常状態の特異場が、均質体中き裂先端近傍で生じるものと類似であることを明らかにし、クリープJ積分に基づいて特異場の強さ変化の予測式を導いている。さらに、クリープ層の変形特性を変化させた解析を行い、定常状態では特異応力場がHRR場と称される界面端からの距離の $1/(n+1)$ 乗（ n はべき乗クリープ則の指数）に比例する特異性とほぼ一致することを指摘している。一方、クリープひずみの発生状況より、クリープ支配領域がクリープ層の界面端から順次拡大する様相を明らかにするとともに、大規模クリープから小規模クリープへの応力場の遷移との対応関係を示している。

第3章では、負荷時に弾性特異場が現れない場合および負荷時の弾性特異場が弱い弾性・クリープ2層材料における界面端近傍のクリープによる応力場変化について有限要素法解析を行い、特異な応力場遷移特性を発見している。均質体中のき裂先端近傍や切欠き底近傍の場合などに見られるように、一般的に、負荷後は小規模クリープから大規模クリープへの遷移の過程で応力場の強さが単調に減少することが知られていた。ところが、本ケースでは遷移中に応力場が上昇することを初めて示している。また、クリープひずみの発生状況より、負荷直後にクリープ領域がクリープ層全体に生じ、その後にクリープ集中領域が界面端近傍より発生拡大することを明らかにしている。このプロセスの相違が、本ケースの特別な応力特異場の遷移状況をもたらしていることを指摘している。また、この応力場上昇が生じる条件を、弾性特異場と定常クリープ特異場の係数から判定する方法を示している。

第4章では、弾性・クリープ材料界面が電子材料や微小機械(MEMS/NEMS)材料に多く存在することから、薄膜多層材料界面端近傍におけるクリープによる特異応力場について有限要素法解析を実施し、隣接層によるクリープ領域拡大を阻止する拘束効果について検討している。隣接層がない場合には、大規模クリープ条件下の界面端の応力場を代表するクリープJ積分値は厚さにほぼ比例する。また、この関係を参考に、厚さを用いた無次元化を施すと小規模クリープから大規模クリープへの遷移期間を含めて1本のマスター曲線で表せることを示している。一方、隣接層がある場合には大規模クリープ下のクリープJ積分値も厚さに比例しない部分が現れる。したがって、無次元化表示の場合には遷移期間はマスター曲線が存在するが、定常に達する部分で拘束による相違が生じることを明らかにしている。換言すれば、遷移に要する時間が異なることを示している。

第5章では、クリープ・クリープ2層材料における界面端近傍の小規模クリープから大規模クリープへの応力場遷移について有限要素法解析を行い、顕著な遷移特性を示すことを明らかにするとともに、その挙動の詳細について検討している。両層のクリープ指数の大小と弾性係数の大小によって応力場の遷移様相および定常状態の応力特異性が異なることを指摘し、両者を比較することによってクリープ・クリープ2層材料界面端の応力場の特性を整理できることを明らかにしている。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、異材界面が表面と会合する界面端近傍のクリープ変形下における応力場の遷移とその場の強さを明らかにすることを目的に、詳細な数値解析を行っている。得られた主な結果は、以下のとおりである。

1) き裂や切欠きを有する均質材料では、負荷の瞬間にはその応力集中部（き裂先端近傍または切欠き底近傍）において弾性応力分布が現れるが、クリープの進行とともにその応力場が変化する（小規模クリープ SSC から大規模クリープ LSC への遷移）。そして、十分な時間が経過すると、定常なクリープ応力分布を示す。界面端は、一般に弾性変形下において特異な応力分布を有する。この知見を基に、負荷時に強い弾性特異応力場を有する弾性・クリープ 2 層材料における界面端近傍の SSC から LSC への応力場遷移について数値解析を行っている。また、界面端の幾何学的形状が異なる場合の遷移挙動について解析し、そのプロセスを明らかにするとともに遷移挙動の基本分類を行っている。

2) 前項の結果を基に、負荷時に弾性特異応力場が発生しない界面端や特異性が弱い界面端における界面端近傍の SSC から LSC への応力場遷移について数値解析を行っている。その結果、SSC から LSC への遷移中に応力上昇が生じる場合があることを初めて示し、そのプロセスの詳細を明らかにしている。

3) 実際のデバイスで重要となる薄いクリープ層の効果について、解析している。この場合、クリープ領域の拡大は隣接する層からの拘束を受け、これによってクリープ・弾性 2 層材料の界面端近傍の特異応力場の遷移が変化することを示すとともに、膜厚がその SSC から LSC への応力場遷移に及ぼす影響を明らかにしている。

4) 両材料がクリープを生じる界面端近傍の応力場について数値解析を行い、複雑な SSC から LSC への応力場遷移プロセスを明らかにしている。

以上、要するに本論文は、クリープ構造体の界面端近傍の応力場の特性を連続体力学に基づく詳細な解析に基づいて体系的に検討したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 21 年 1 月 6 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。