SiC 粒子分散 Al 合金基複合材料のクリープにおける強度と損傷評価に関する研究

坂　本　正　雄*

Creep strength and creep damage in SiC particulate reinforced aluminum alloy composite material

by Masao SAKAMOTO

セラミックス粒子分散アルミニウム合金基複合材料は，耐熱性のある高比強度材料として未複合化金属に代わり，輸送機器や電子部材などへ利用され始めている。実用化に際しては，信頼性を確保し，安全な利用を図るためには強度および損傷評価技術の確立が急務である。

SiC 粒子分散アルミニウム合金基複合材料は，アルミニウムの利用限界温度を超える，350℃（623K, T/Tm≈0.67）を一つの目標温度とした材料開発を中心に試みられてきた。そのため，クリープに関する研究も高温度域のクリープ強化メカニズムからのアプローチが多く，アルミニウムの実用温度領域 450K 以下（T/Tm<0.48）における信頼性・安全性の観点からの研究はきわめて少ないのが現状である。特に，1～10 μmオーダーのセラミックス粒子分散金属では，粒子の複合化により，材料特性の向上は可能であるが，同時に不均一性も増すために信頼性評価が必要不可欠と考えられている。このような背景から，本研究では，セラミックス粒子分散アルミニウム合金基複合材料の高温における信頼性および安全性の向上を目的として，クリープにおける強度と損傷評価に関する検討を行った。

本論文は，まず SiC 粒子分散アルミニウム合金複合材料のクリープ試験を行い，クリープ強度評価を試みる。そしてクリープ破断寿命に最も関連のあると考えられる 3 次クリープ域を中心にクリープ損傷の形態を観察し，粒子複合材料のクリープ損傷の特徴を明らかにする。その結果，複合材料特有の損傷過程を反映したクリープ損傷評価手法として除荷弾性率法を開発しクリープ損傷の評価を行った。除荷弾性率法により求められる除荷弾性率をパラメータとすると，粒子体積率の異なる複合材料のクリープ損傷を一つの式で定式化され，寿命予測判定の指針とすることができることが確認された。さらに，クリープ損傷と 3 次クリープ変形挙動との関係を明らかにし，余寿命予測手法の開発の方向性を示した。

本論文は 6 章からなり，その構成は次の通りである。本論文の研究を通して明らかになったことを要約すると以下のようになる。

第 1 章では，緒論であり，粒子分散複合材料のクリープに関する最近の現状を説明するとともに，現状での問題点を明らかにする。

第 2 章では SiC 粒子分散 6061 アルミニウム合金複合材料のクリープ試験を行い，クリープ強度特性の評価を試みた。複合材料は，平均粒子径が 3 μm の SiC 粒子を 6061 アルミニウム合金中に分散させ

*新潟大学大学院自然科学研究科
現在　独立行政法人　物質・材料研究機構
〔新潟大学博士（工学）　平成 17 年 3 月 23 日授与〕

た，SiC粒子分散アルミニウム合金基複合材料（以下，SiCp/A6061という）を対象とした。粒子体積率は10，20および30vol%の3種類である。これら材料から直径6 mm，ゲージ長さ30mmの丸形試験片を作成し，443Kを中心とした温度領域でのクリープ試験を行った。

SiCp/A6061のクリープ変形強度および破断強度特性の評価は，最小クリープ速度，クリープ破断時間，応力およびひずみと粒子体積率における関係を検討した。その結果，粒子体積率の影響はしきい応力の概念を用いた有効応力で評価できることを明らかにし，有効応力と最小クリープ速度およびクリープ破断時間との関係をクリープ構成式で評価できることを示した。また，高温側におけるクリープ破断特性は，低延性破壊を生じさせることに関して，アルミニウムの破壊機構図と対応させ，粒界破壊応力条件に対応することを明らかにした。

第3章では，クリープ破断寿命に最も関連のあると考えられる3次クリープ域を中心にクリープ損傷の形態を観察し，粒子複合材料のクリープ損傷の特徴を明らかにする。

SiCp/A6061のクリープ損傷材をSEMにより観察した結果，粒子とマトリックスとの界面にボイドが形成されることを示した。クリープ破断材の破断部近傍の縦断面ではほとんどの粒子についてボイドの存在が認められた。この破断部近傍ではボイドの面積率は1.7から2%存在した。一方，A6061マトリックス材では，ボイドの形成は観察されなかった。SiCp/A6061におけるクリープ損傷形態は，粒子とマトリックスとの界面にボイドが形成されることが特徴であることが示された。また，クリープ試験中断を行い，クリープ中の密度変化を測定しクリープ損傷の定量化を試みた。その結果，3次クリープ領域はこのボイドの形成・成長過程であることを明らかにした。

第4章では，3章で観察されたSiCp/A6061における特有の損傷形態を反映したクリープ損傷の評価手法について検討した。クリープ中に形成されるボイドは複合材料の弾性率にも影響を与えると考えられる。そこで，損傷評価手法として除荷弾性率法を用いた。除荷弾性率法はクリープ試験中にクリープ荷重を除荷することによって得られる応力とひずみの関係から求めた弾性率を利用する方法である。この手法はクリープ試験を時間を追って測定することができる利点がある。また，クリープ試験温度を保ったままで行うことができることからその場観察に近い測定値が得られる点に特徴がある。除荷弾性率法により求められる除荷弾性率をパラメータとすると，粒子体積率の異なる複合材料のクリープ損傷を一つの式で定式化され，寿命予測判定の指針とすることができることが確認できた。第4章までの結果から，SiCp/A6061ではクリープ損傷は，特有の損傷過程を経ることが示された。そこで，3次クリープ領域におけるクリープ変形挙動にも特徴が見られることが予測される。

第5章では，クリープ損傷が加速されるといわれる3次クリープ域におけるクリープ変形挙動とクリープ損傷との関連を検討し，余寿命評価への指針を示した。SiCp/A6061の3次クリープ域における変形挙動はクリープ速度の対数とクリープひずみとの間に線形の関係で変化する挙動を示すことを明らかにした。そこで，3次クリープ変形構成式であるΩ法を適用して3次クリープの変形について検討した。その結果，SiCp/A6061の3次クリープ変形の応力依存性はΩ値で示された。3次クリープ変形挙動と除荷弾性法から求めた損傷パラメータとの関連を検討し，損傷パラメータとクリープ寿命との関連を明らかにし，除荷弾性率から求めたクリープ損傷パラメータとΩ値とを用いると，余寿命の推定が可能であることが示された。

第6章において，本研究で得られた成果をまとめ，今後の検討課題，将来展望について述べた。

終わりに，指導を賜わりました田邊裕治教授に深甚の謝意を表します。