

委託研究「Al合金におけるスモールパンチクリープ強度と微細組織の相関の解明」 (研究テーマ：放射線・放射線場を用いた材料科学技術の開発) 研究成果報告概要

研究開発の概要

(研究実施期間) 令和2年度～令和3年度

(目的)

高温高圧環境下で用いられる材料では、時間の経過とともに徐々にひずみが導入されるクリープ現象を制御することが必要である。近年、微小な試料からクリープ特性を評価することに産業的需要が高まっている。本研究では、典型的な固溶体合金であるA5052合金(Al-Mg合金)の微小試料を用いたスモールパンチクリープ(SPC: Small Punch Creep)試験を行い、単軸クリープ試験から得られる結果との互換性を検討した。また、SPC試験後の試験片の変形組織を観察し、その特徴を評価した。

(必要性)

発電プラントや輸送機器の内燃機関等に用いられる耐熱材料は、高温環境下に長時間曝される。これらの材料を継続的に使用するためには、使用中の損傷劣化状態を定量的に評価する必要がある。損傷劣化状態のパラメータとして、クリープ特性が挙げられる。一般的なクリープ試験(単軸クリープ)では比較的大きな試験片を必要とし、損傷部から局所的に試験片を採取することが困難となる。この問題を解決するために、SPC試験の発展が期待されている。

(新規性)

SPC試験法に関する規格は未だ確立されておらず、多数の知見を積み重ねることによる変形応答の理解が求められる。特に単軸クリープ試験結果との互換性を含めた検討は、SPC試験結果の評価に対して大きな需要がある。また、材料科学的知見に基づいた変形挙動の理解は十分に進んでいるとは言えない。特に従来のSPC試験に関する研究は破断寿命に関するものが多く、クリープ変形中の材料組織変化と変形特性を関連付けた理解はなされていない。

(独創性)

本研究では、広範囲の温度と荷重条件におけるSPC変形挙動を調査することにより、SPC試験と単軸クリープ試験から得られるクリープ特性を直接比較する因子の存在を検討した。ここでのクリープ特性として、変形速度の応力依存性を示す応力指数、変形速度の温度依存性を示す活性化エネルギー、および破断寿命を選択した。また各位置における微細組織の変化から単軸クリープ試験との共通点について調査した。

(有用性)

SPC試験法の確立は、小指の先ほどの微小な試料を用いたクリープ特性調査を可能にする。その結果として、使用中の発電プラントから微量の試料を切り出すことで、使用中の損傷劣化状態を定量的に評価することが可能になる。これは、比較的大きな試料を必要とする従来の単軸クリープ試験では不可能であり、構造物の力学的信頼性を評価することに繋がる。また、微小試料からクリープ特性を評価することで、迅速な耐熱材料開発に寄与すると期待される。

研究成果

図1に各条件で行ったSPC試験から得られた変位-時間曲線を示す。本研究における全ての試験条件において、変形初期における変位速度の低下、変形中期における定常的な変形、および変形後期における変位速度の上昇が確認された。この変形挙動は、一般的な単軸クリープにおける変位速度の上昇が確認された。この変形挙動は、一般的な単軸クリープにおける変位速度の上昇が確認された。また、変形速度の温度および荷重依存性が確認された。単軸クリープにおける定常変形時のひずみ速度と負荷応力の関係は以下の経験式で表される。 $\dot{\epsilon} = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$...Eq. (1) ここで、 $\dot{\epsilon}$ は定常ひずみ速度、 A は定数、 σ は応力、 n は応力指数、 Q はクリープ変形の活性化エネルギー、 R はガス定数、 T は絶対温度である。Eq. (1)を基として、SPC試験時の変形挙動を解析する。本研究におけるSPC試験においては試験片形状が常に一定であることから、Eq. (1)は以下のように書き換えられる。 $\dot{h} = BF^{n'} \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$...Eq. (2) ここで、 $\dot{h}$ は定常変位速度、 B は定数、 F は荷重である。また、単軸クリープにおける応力指数 n に対応する値としてSPC変形時における荷重指数 n' を定義する。Eq. (2)に基づき、次頁以降の変形挙動解析を行う。

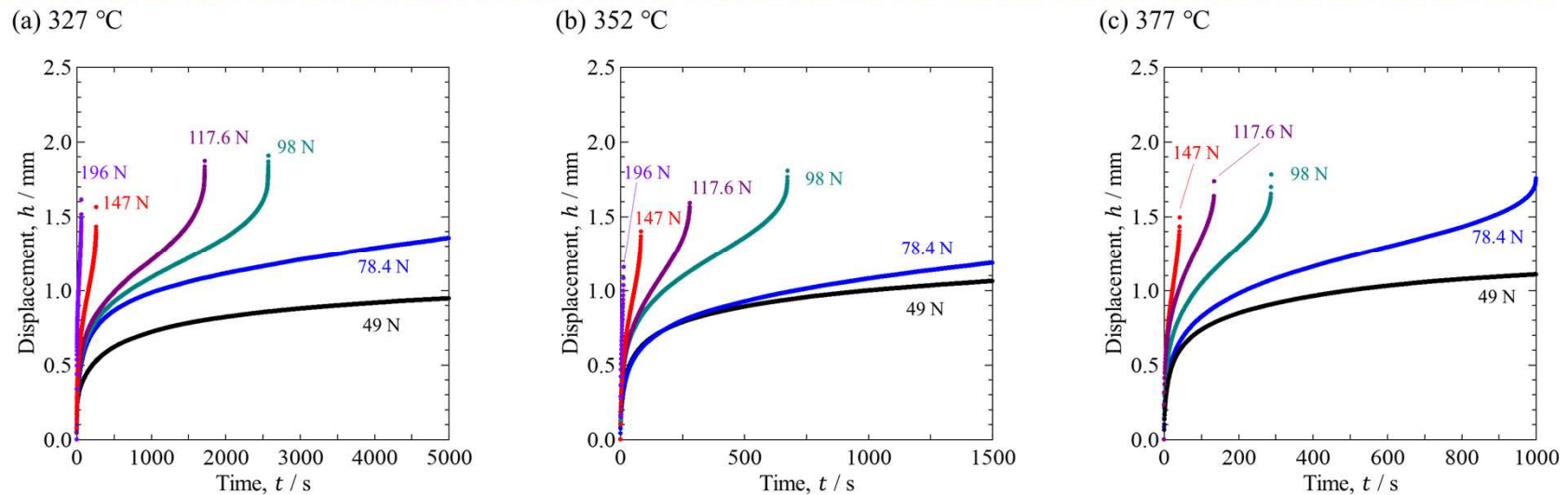


図1 A5052合金における種々の温度、荷重におけるSPC試験結果

研究成果

図2に定常変位速度と荷重の関係を示す。Eq. (2)より、定常変位速度と荷重の両対数の関係を示す図2における近似直線の傾きが荷重指数 n' となる。図2より、本研究のSPC条件における荷重指数 n' の平均値は5.8と見積もられた。この値は、単軸クリープから得られるAl-Mg合金の応力指数 n (~5)と矛盾しない。この結果は、SPCおよび単軸クリープから得られるパラメータの間に互換性があることを示唆している。図3に定常変位速度と温度の逆数の関係を示す。Eq. (2)より、図3における近似直線の傾きが $-Q/R$ となる。図3より、本研究の試験条件におけるSPC変形時の活性化エネルギーの平均値は149 kJ mol⁻¹と見積もられた。クリープの活性化エネルギーからは、そのクリープ変形を支配している拡散現象に関する情報を得ることができる。Al中のMgの拡散の活性化エネルギーは130.5 kJ mol⁻¹であり、SPC試験から得られた活性化エネルギーの値と矛盾しない。またこの値はAl-Mg合金の単軸クリープから得られるクリープの活性化エネルギーである140.7 kJ mol⁻¹とも近く、この結果もまたSPCおよび単軸クリープから得られるパラメータの間に互換性があることを示唆している。

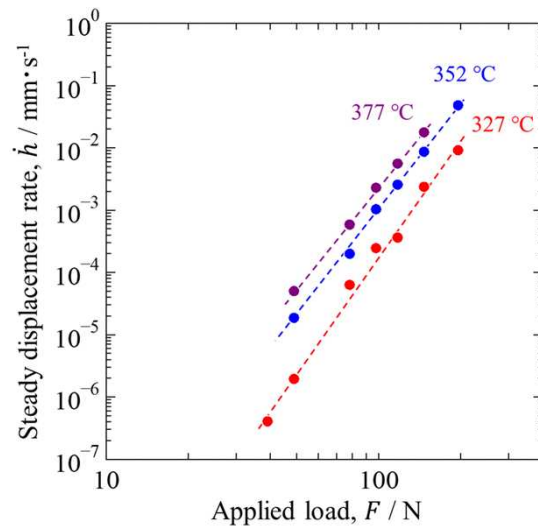


図2 定常変位速度の荷重依存性

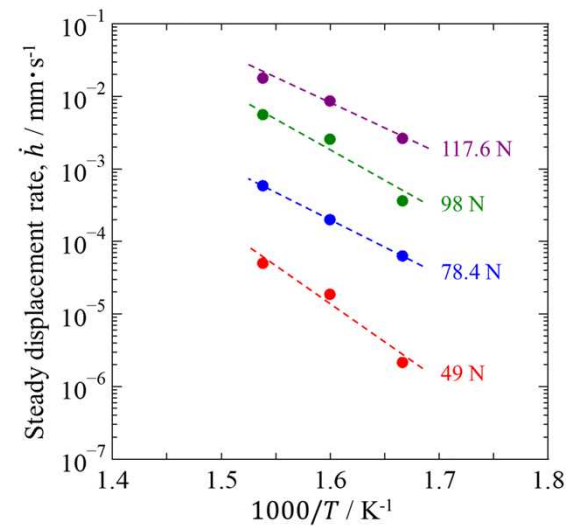


図3 定常変位速度の温度依存性

研究成果

図4に破断寿命 t_r のSPC条件依存性を示す。SPC試験における破断寿命と試験荷重の間には以下に示すべき乗測の関係が得られた。ここで、SPCおよび単軸クリープ試験から得られた結果の互換可能性についてを検討する。本研究における352 °CでのSPC試験結果と、先行研究における350 °Cにおける単軸引張クリープ試験結果を比較する。これらの試験温度は2 °C異なるが、ここでは近いものと考え比較を行う。一般的に、単軸引張クリープ試験における破断寿命と応力の間には、以下の関係が経験的に成り立つことが知られている。 $t_r = D\sigma^\beta$...Eq. (4) ここで、 D および β は定数である。図5にSPC試験および単軸引張クリープ試験から得られた破断寿命と荷重および応力の関係を示す。単軸引張クリープ試験における各破断寿命における応力に対応するSPC試験における試験荷重を、2種類のクリープ試験から得られたEq. (4)に基づく近似直線を用いた最小二乗法により計算した。その結果、本SPC試験条件における破断寿命と単軸クリープ試験における破断寿命に関して、 $F = 3.7\sigma$...Eq. (5) の関係が得られた。この結果は、SPC試験及び単軸クリープ試験から得られる破断寿命の間には互換性があることを示唆している。

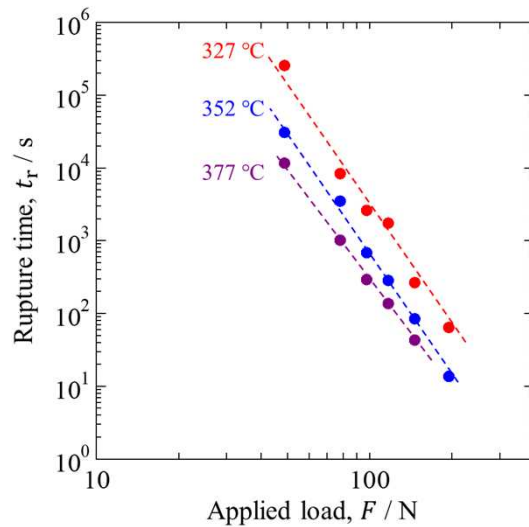


図4 各条件のSPC試験から得られた破断時間

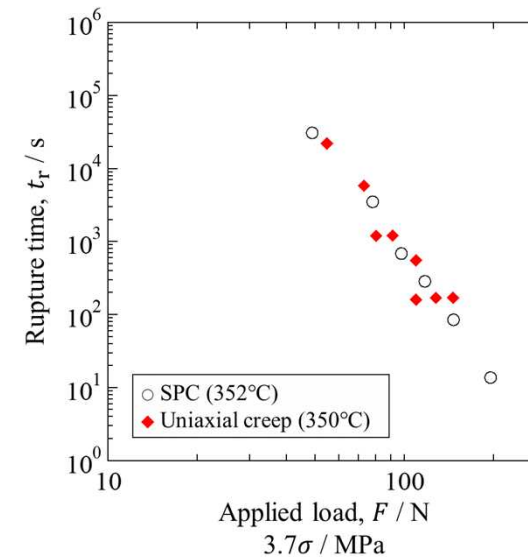


図5 SPC試験および単軸クリープ試験から得られた破断時間の比較

研究発表

1. 野坂尚生, 峯田才寛, 徳永透子, 佐藤裕之, 0.7Tm近傍におけるA5052合金のスモールパンチクリープ変形挙動および変形組織, M&M2022材料力学カンファレンス, 弘前, 2022年9月26日

研究会等の開催

1. 2022年2月18日 QSC活用セミナー (感染症感染拡大により中止)

発表論文

1. 野坂尚生, 峯田才寛, 徳永透子, 佐藤裕之, 0.7Tm近傍におけるA5052合金のスモールパンチクリープ変形挙動および変形組織, 材料力学カンファレンス講演論文集, OS0401 (2022)

青森県内への波及効果

SPC試験は原子力材料等の耐熱材料の開発における需要が高い。そのため、本手法を確立させることで、原子力材料の効率的な開発が可能となる。SPC試験により、材料の正確な破断寿命の予測ができれば、より優れた材料の実用化時期が早まる。また、変形速度や破断寿命の予測ができれば、軽水炉の安全性が向上し、稼働率の向上が見込まれる。そのため、燃料の使用量が増加するため、青森県が保有する原子燃料サイクル施設の需要が高まり、青森県技術の発展につながる。