

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06499

研究課題名(和文) RBTによる変調組織の形成による室温・高温強度の同時改善

研究課題名(英文) Improvement of strength at both ambient and high temperatures by formation of modulated structure distribution by RBT.

研究代表者

佐藤 裕之 (SATO, HIROYUKI)

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：10225998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：高温クリープ強度を改善する方法として、回転曲げと引張のRBT複合負荷によって材料学的組織に分布を形成することを試み、アルミニウム合金を対象として硬度分布を持つ組織を形成した。遷移クリープのクリープ曲線形状はRBTによって影響を受け、硬度に明瞭な分布がある場合に遷移クリープにおけるクリープ曲線形状が変化する場合がある。RBTと熱処理によって高温強度を改善できる場合がある。クリープ曲線の形状を定量的に評価するためにひずみ加速指数(SATO-Index)を用いてクリープ曲線を解析した。クリープ曲線を複数の区間に分けて評価することによりクリープ曲線を再現できる。

研究成果の概要(英文)：To improve creep strength, macroscopic distribution of microstructure is formed by combination of rotary-bending and tensile loading, named RBT-loading (Rotary-Bend and Tensile loading) in aluminum alloys. Shape of creep curve in transient creep regime are influenced by RBT-loading, and creep curve show complex behavior when microstructural distribution is formed. It is suggested that creep strength in primary regime can be improved by combination of RBT-loading and heat treatment.

Creep curves are analyzed by Strain-Acceleration and Transition Objective Index (SATO-Index). It is shown that the entire creep curve of alloys including complex primary behavior can be reconstructed by a method of SATO-Index with section partitioning.

研究分野：高温変形

キーワード：クリープ 高温変形 クリープ曲線 ひずみ加速指数 遷移クリープ 寿命予測 アルミニウム合金
組織勾配

1. 研究開始当初の背景

(1) 金属系結晶材料の強度特性は、高温と室温では異なる組織依存性を持ち、室温強度と高温強度を同時に改善することが容易でない。たとえば結晶粒の微細化は室温強度の改善に有効であるものの、 $0.5T_m$ (T_m は絶対温度で表した融点)以上の高温ではクリープ速度の増大をもたらすことが多い。代表者は回転曲げと引張を組み合わせた複合負荷 (Rotary-Bend and Tensile loading, RBT, 図1)と熱処理を組み合わせて人工的な変調組織を作ると、室温強度と高温強度を同時に改善できる場合のあることを見いだしている。RBTによって、相反することの多い室温強度と高温強度を両立させつつ、より一層強靱な合金や機械要素を作製できるようになる可能性がある。

(2) 金属や合金の高温強度は、クリープ変形を考慮して評価される。応力とクリープ速度の複雑な関係を整理するための代表的かつ基本的なパラメータとして、破断寿命と最小ひずみ速度を用いて整理されることが多い。しかしながら、これらはクリープ曲線を代表するパラメータとしてクリープ曲線の一部だけから評価され、最小ひずみ速度と破断寿命の関係を簡単な関係で整理できない場合がしばしば現れる。適切な高温長時間強度の評価のためには、最小ひずみ速度や破断寿命だけでなく、クリープ特性やクリープ曲線の形状も考慮して検討し寿命の予測に役立てる必要がある。

(3) 代表者は、クリープ曲線の形状を定量化し、クリープ曲線全体を外挿することができる量として、ひずみ加速指数 (SATO-Index; Strain Acceleration and Transition Objective Index) を提案している。この量を用いると、通常型の遷移クリープが現れるクリープ曲線を、従前から用いられている最小ひずみ速度に関するパラメータ (最小ひずみ速度、最小ひずみ速度をとる時間、ひずみ)と組み合わせて、クリープ曲線全体を少数のパラメータで整理し外挿することができる。この方法は、クリープ変形中のひずみ速度の変化を、ひずみ速度のひずみ依存性に注目して整理し、対数ひずみ速度-ひずみ曲線の曲率に注目して定量化を行い、対数ひずみ速度とひずみの微分方程式からクリープ曲線を再現する方法で、最小ひずみ速度をとるひずみでひずみ加速指数を定める場合には、ひずみ加速指数 α は下式で定義される。

$$\alpha = \frac{d^2}{d\varepsilon^2} \log_{10}(\dot{\varepsilon}/s^{-1}) \Big|_{\varepsilon=\dot{\varepsilon}_{\min}}$$

ひずみ加速指数から、ひずみ速度とひずみ ε を結びつける下の微分方程式が得られる。

$$\log \dot{\varepsilon}(\varepsilon) = \frac{\alpha}{2}(\varepsilon - B)^2 + C$$

ここで、 B と C は、クリープ曲線から定まる、

最小ひずみ速度が現れるひずみと、最小ひずみ速度から定められる定数である。この微分方程式を数値的に解くことによってクリープ曲線を再構成することができる。

(4) 固溶強化合金ではクリープ曲線のほぼ全体を一つのパラメータの組で整理できることが多い。この方法を拡張すると、クリープ曲線の一部からクリープ曲線を再現することができ、外挿して得られるクリープ曲線から寿命を予測することができる可能性がある。その適用性をさまざまな合金で確認し、その可能性を検討する必要がある。また、従来用いられてきたクリープ強度の評価法とも比較して検討することが望まれる。

(5) 組織や強度の異なる領域を持つ合金の高温変形では、変形に伴うひずみの整合性を保つために応力の再分配が組織変化と同時に進行することが予想され、クリープ挙動が均一な組織の材料とは異なると予想される。クリープ特性を整理するためには、クリープ曲線の形状を考慮してクリープ挙動の解析や整理を行うことが必要である。

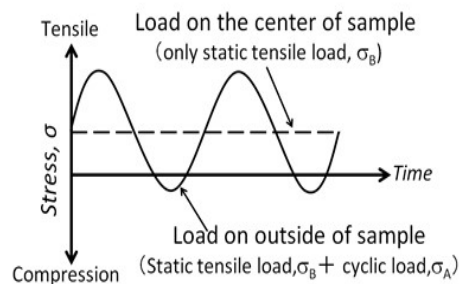


図1 RBT 負荷により丸棒試験材に負荷される繰り返し応力の時間変化

2. 研究の目的

(1) 本研究は、合金にマクロ組織の変調構造や分布を形成し、一般には相反することの多い室温強度と高温強度を同時に改善させようとするもので、実験的な知見を蓄積することと、強化の学理の探求を目的とする。代表者が最近見いだした、アルミニウム合金での、回転曲げと引張の複合負荷 (RBT 複合負荷) によって材料学的な変調組織を形成することで、室温強度と高温強度とを同時に改善することができることを礎として、合金を対象として実験的に強化の可能性を探索する。

(2) 実験的に観察されるクリープ曲線は、変形条件によってその形状が大きく変化し、複雑な様相を示す場合がある。「ひずみ加速指数」を用いてクリープ曲線を整理する方法を検討し、合金のクリープ曲線をより正確に表現する方法を検討する。

(3) 代表者が提案している、高温クリープ挙動を「ひずみ加速指数」によって定量化し外挿する方法を用いて、変調組織を持つ合金の高温クリープ挙動を定量的に評価・検討し、変調組織の作り込みによる強化の指針を模

索する。複合的な組織を有する試験材のクリープ曲線を再現するための方法としてひずみ加速指数を適用することの可能性を検討するために、単純な複合モデルを用いてクリープ曲線の形状変化を再現することができるかどうかを検討する。

(4) クリープ挙動を整理するために従前から用いられてきた方法と、ひずみ加速指数を用いる方法の特徴を整理するための一歩として、従前から用いられてきたクリープ特性の整理方法の特徴を検討する。

3. 研究の方法

(1) RBTによる変調組織形成の実験的検討：前項で記したように、回転曲げを主とする複合応力下で丸棒試験片に半径方向に分布を持つ負荷を加えるためにRBT負荷を加え、熱処理とあわせて組織や強度に分布を持つ試験材を作製する。RBT負荷の条件(応力状態、負荷回数)と熱処理条件とを組み合わせ、合金の粒径分布や硬度などの変調組織を得るための条件を実験的に探索する。

(2) 室温および高温強度の実験的評価：RBT負荷と熱処理により作成した、組織や強度に空間的な分布を持ち、組織や強度が均一ではない試験材について、室温および高温における強度を評価する。変調組織や組織に空間分布がある場合の強度が、均一な組織の場合とどのように異なるのか実験的に調べる。高温における強度については、主に長時間強度に及ぼすRBT負荷の影響を調べるために、高温クリープ試験を行い評価する。時間依存型の塑性変形挙動を実験的に明らかにする。クリープ試験は、真応力を一定に保持する機構を有するクリープ試験機を用い、真応力一定の下でのクリープ曲線を実験的に得る。クリープ曲線から得られる最小ひずみ速度を代表値とする高温強度を評価するほか、次項のクリープ曲線の解析に供するためクリープ曲線も対象として変形挙動を評価する。

(3) 「ひずみ加速指数」によるクリープ曲線の定量的評価：変形組織の変化や安定性を反映し、クリープ曲線の形状を定量的に表す量としての「ひずみ加速指数」を用いてクリープ挙動を評価する。従前のクリープ挙動の解析法とも比較しながら「ひずみ加速指数」による評価法の特徴を検討する。

これらの実験結果と評価結果に基づき、微細な機械要素に材料学的組織の勾配や変調組織を作り込むことによって優れた力学的特性を発現させるための基礎的な知見や指針を検討する。

(4) 工業的には合金のクリープ破断寿命を高温強度の指標として用いることが多い。クリープ強度を整理する指標として用いられる破断寿命を整理し外挿するために用いられるラーソンミラーの定数と、クリープ速度の温度依存性を反映するクリープの活性化エネルギーの関係を整理し検討する。代表者

が提案しているひずみ加速指数を用いる方法と比較する。

4. 研究成果

(1) 室温強度を損なうことなく高温クリープ強度を改善する方法として、回転曲げと引張のRBT複合負荷によって材料学的組織に分布を形成することを試み、適切な負荷条件を見出した。Al-Cu系とAl-Mg系アルミニウム合金を対象とし、熱処理とRBTにより硬度分布を持つ組織を形成することができた。

(2) 上述の組織に分布を持つ試料のクリープ挙動を調べた。高温クリープ試験の結果、遷移クリープのクリープ曲線形状はRBTによって影響を受けるが、加速クリープに至る過程ではクリープ曲線形状の差は小さいことが明らかにされた。硬度に明瞭な分布がある場合に遷移クリープにおけるクリープ速度が大きく低下する場合があります、RBTと熱処理によって遷移クリープにおける高温強度を改善できる場合があることが示された。ひずみの小さい遷移クリープの強度改善は実用上も価値がある。

(3) クリープ曲線の形状を定量的に評価し、さらにクリープ曲線を再構成したり外挿したりする方法として代表者が提案しているひずみ加速指数を用いてクリープ曲線を解析すると、組織に分布を持つ合金のクリープ曲線を複数の区間に分けて評価することによりクリープ曲線全体を再現することができる。前項に記したように、RBTによって組織に分布を形成すると、均一な組織を持つ合金とは異なる形状のクリープ曲線が現れる。クリープ特性に空間的な分布がある場合のクリープ曲線形状を、ひずみ加速指数と組み合わせた数値モデルによって検討し、クリープ曲線形状の変化を検討した。下図に、単純な2領域モデルを仮定して得られたクリープ曲線の再現結果の例を示す。ひずみ速度のひずみ依存性が異なる領域がある場合には、遷移クリープ域でのクリープ曲線形状が組織や強度が均一な場合とは一致しないことや、

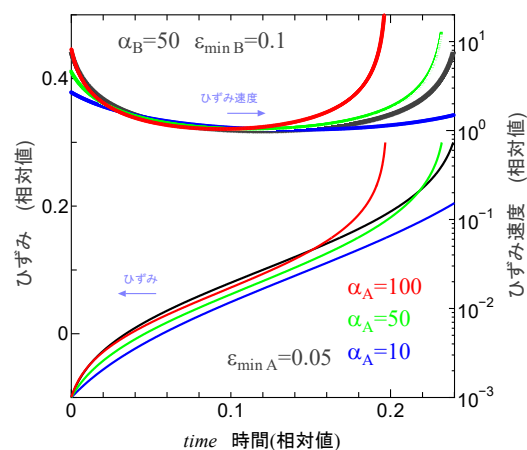


図2 クリープ特性の異なる領域を持つ場合のクリープ曲線の再現例

破断寿命にも影響を及ぼすことを見出した。この方法を発展させると、強度やクリープ特性に分布がある場合のクリープ曲線を再現したり予測したりすることができるようになることと期待できる。

(4)破断寿命の応力依存性や温度依存性を整理するために用いられるラーソンミラーの定数と活性化エネルギーの関係を複数の合金系を対象として明らかにした。クリープの活性化エネルギーが拡散の活性化エネルギーと概ね一致する場合のラーソンミラーの定数は約 13 に相当する。従前の方法では、クリープ破断寿命を実験的に評価する必要があるが、代表者が提案しているひずみ加速指数を用いる方法では、クリープ曲線の一部からクリープ曲線全体を再構成することができ、短時間試験の結果から寿命を検討することができる可能性がある。従前の評価や外挿の方法と比較しつつひずみ加速指数を用いる方法をより詳細に検討することで、新しい寿命予測法として発展させることができると期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① K. Maruyama, F. Abe, H. Sato, J. Shimojo, N. Sekido, K. Yoshimi; “On the physical basis of a Larson-Miller constant of 20”; International Journal of Pressure Vessels and Piping, 159 (2018), 93-100.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2017.11.013> (査読あり)

② Hiroyuki Sato; “Extrapolation of Imaginal Minimum Creep Rate in Compression by a Concept of SATO-Index”; Key Engineering Materials, 741 (2017), 99-104.

<https://www.scientific.net/KEM.741.99> (査読あり)

[学会発表] (計 9 件)

① 佐藤裕之; “ひずみ加速指数によるクリープ曲線の再現”;

日本金属学会東北支部地区講演会「新しい金属材料の開発と評価法」; 秋田県秋田市; 2017. 11. 17

② Hiroyuki Sato; “Analysis and reconstruction of creep curve by Strain Acceleration and Transition Objective Index in some solid solution alloys”; Frontiers in Materials Processing Applications, Research & Technology, FiMPART ‘17, Bordeaux, France; 2017. 07. 10

③ K. Maruyama, F. Abe, H. Sato, J. Shimojo, K. Yoshimi; “On Physical Basis of Larson-Miller Constant of 20”; 14th

International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, CREEP2017;

Saint Petersburg, Russia; 2017. 06. 20

④ 佐藤裕之; “ひずみ加速指数を用いたクリープ曲線の再構成”;

第 161 回日本金属学会秋期講演大会, 札幌市; 2017. 09.

⑤ H. Sato; “Extrapolation of Imaginal Minimum Creep Rate in Compression by a Concept of SATO-Index”;

New Methods of Damage and Failure Analysis of Structural Parts; 神奈川県横浜市; 2016. 11. 01-04

⑥ 前田悠太郎, 藤原誠也, 有馬聖人, 紙川尚也, 佐藤裕之; “RBT によって組織勾配を形成した A2017 合金のクリープ曲線の定量評価”;

第 14 回 日本金属学会 東北支部研究発表大会, 弘前市; 2015. 12. 05

⑦ 佐藤裕之; “通常型クリープ曲線を構成する微分方程式の発見”;

日本金属学会 高温変形の組織ダイナミクス研究会, 青森県弘前市; 2015. 08. 23

⑧ Hiroyuki Sato; “Evaluation and Extrapolation of Entire Creep Curve by “Strain Acceleration and Transition Objective Index” with Interval Partitioning”;

13th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures, CREEP2015; Toulouse, France; 2015. 5. 31~6. 4

⑨ 佐藤裕之, 上野功樹, 前田悠太郎; “2017 アルミニウム合金の高温クリープ挙動に及ぼす RBT による複合負荷の影響”;

軽金属学会 第 128 回春季大会; 宮城県仙台市; 2015. 5. 17

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 裕之 (SATO, Hiroyuki)

弘前大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 10225998