

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560842

研究課題名(和文)高温クリープにおけるひずみ加速指数と変形機構

研究課題名(英文) Strain Acceleration and Transition Objective Index and Deformation Mechanisms in High Temperature Creep

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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：合金のクリープを理解し長時間寿命の評価に反映させるには、変形の様相を定量的に把握する必要があり、クリープ曲線の形状を代表させる量としてのひずみ加速指数(SATO-Index)を検討した。クリープ曲線の形状をひずみ速度の変化として定量化すると、クリープ曲線の一部からでもクリープ曲線を外挿できる。回転曲げと引張の複合負荷装置(RBT試験装置)を使用し、アルミニウム合金を対象として材料学的組織に勾配を形成することを試み、組織勾配を有する合金のクリープ曲線を、組織勾配のない場合と比較検討した。ひずみ加速指数を用いると、通常型とは異なる複雑な形状のクリープ曲線も定量的に評価できることを明かにした。

研究成果の概要(英文)：A quantitative method of creep curve evaluation by “Strain Acceleration and Transition Objective Index (SATO-Index)” is proposed and studied. The SATO-Index represents a shape of creep curve as strain rate sensitivity on strain during creep, and makes it possible to extrapolate entire creep curve from a part of creep curve. The possibility of better extrapolation of creep life with shorter experiments is suggested.

To obtain modulated microstructures, I made prototype equipment of “Rotary Bend and Tensile loading (RBT loading).” In aluminum alloys, modulated micro structures are formed by the prototype, and creep curves of samples with modulated microstructures are analyzed and compared by SATO-Index. It is concluded that SATO-Index handles and quantitatively characterizes different shapes of creep curve, and is a unique value that represents creep characteristics.

研究分野：高温変形・クリープ

キーワード：高温変形 クリープ曲線 寿命予測 耐熱合金 アルミニウム 銅合金 組織勾配 残留応力

1. 研究開始当初の背景

(1) 金属や合金の高温長時間強度は、クリープ特性を反映する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の一部だけから評価される量で、最小速度ひずみ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。破断寿命とクリープ特性の関係を整理するためには、いくつかの物理量を詳細に検討する必要がある。高温長時間強度を適切に評価するためには、最小ひずみ速度だけ、あるいは破断寿命だけの評価では十分とは言えず、クリープ曲線の形状も考慮して、それらの関係を整理して考察する必要がある。

(2) 代表者らは、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 (SAP- α [1], SATO-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4つのパラメータで整理し外挿することができる。また、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外挿し寿命を予測することができる可能性があり、その適用性を検討する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 実験的に観察されるクリープ曲線は、形状が大きく変化し、複雑な様相を示す場合がある。本研究では、いわゆる二次クリープまでのクリープ挙動と、三次クリープの挙動が異なる材料を含む、様々な合金のクリープ曲線について、ひずみ加速指数を用いてクリープ曲線の評価と定量化を試み、クリープ曲線全体をより正確に表現する方法を検討する。

(2) 高温変形では、材料学的組織に分布や勾配があると、変形中に応力の再分配がおこるので、組織に勾配がある場合にはひずみ速度変化の様相が単相材とは異なる可能性がある。組織に分布をもたせる方法として、代表者らが考案した、回転曲げと引張の複合負荷装置 (RBT 試験装置) を使用し、アルミニウム合金を対象として材料学的組織に勾配を形成することを試み、組織勾配を有する合金のクリープ曲線を、勾配を持たない合金と比較しながら検討する。

異なる場合のあることを見だし、ひずみ加速指数によって定量的に比較できることを確認した。RBTによって組織勾配を作ると、その内部の残留応力は複雑な分布を示すことを2D-XRD法によって明らかにした。いわゆる二次クリープまでの挙動から外挿した破断寿命と実験の結果を比較し、耐熱鋼のク

リーブ曲線の評価にもひずみ加速指数が有用であることを示す。

3. 研究の方法

(1) 様々な合金のクリープ曲線を対象として、ひずみ加速指数によるクリープ曲線の評価を行う。クリープ曲線は、代表者らの実験によって得られたものに加えて、公表されている文献のクリープ曲線も利用する。強化機構やクリープ曲線形状が大きく異なる合金も対象とする。

(2) 組織勾配を形成し、クリープ特性を調べる方法を検討するために、代表者らが考案・試作した回転曲げ・引張複合負荷装置 (RBT 試験装置) を改良し、組織の分布を形成する方法を明らかにするとともに、変形前の組織に勾配が存在する場合のクリープ曲線の形状が変化を検討する。また、内部応力による影響を明らかにする方法として、2D-XRD法による残留応力の変化についても検討する。

4. 研究成果

(1) 合金のクリープを理解し長時間寿命の評価に反映させるには、変形の様相を定量的に把握する必要があり、クリープ曲線の形状を代表させる量としてのひずみ加速指数を検討した。この方法により、最小ひずみ速度と併せた定量化によってクリープ曲線を精度良く外挿できる場合があること、その適用可能性が広いことを明らかにした。ひずみ速度の変化は材料学的組織の変化を反映し、ひずみ加速指数も変形機構の異なる合金では大きく異なること、複雑な形状を示すクリープ曲線は、適切に区間区分をすることによりクリープ曲線全体を定量的に評価・外挿できることを明らかにした。クリープ曲線の一部から外挿される寿命は、解析を行った範囲では、実験による寿命を越えることはなく、安全側にある。

(2) 組織に分布をもたせる方法として、回転曲げと引張の複合負荷装置 (RBT 試験装置) を改良して用いて、アルミニウム合金等を対象として材料学的組織に勾配を形成する方法を見いだした。これらの合金のクリープ曲線は、組織に勾配を持たない合金と異なる場

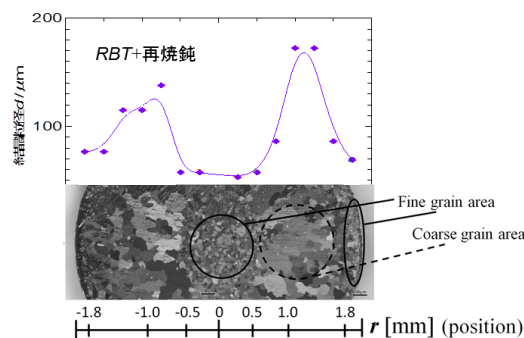


図1 RBTによって得られた変調組織 (粒径)の例

合のあることを見だし、ひずみ加速指数によって定量的に比較できることを確認した。RBTによって組織勾配を作ると、その内部の残留応力は複雑な分布を示すことを2D-XRD法によって明らかにした。

(3) ひずみ加速指数を用いると、通常型とは異なる形状のクリープ曲線も定量的に評価できる。逆遷移型の遷移クリープやS字型のクリープ曲線が現れる固溶強化合金や、実用耐熱合金についても、ひずみ加速指数によってクリープ曲線の形状を定量的に評価できることを明かにした。ひずみ加速指数は、様々な合金のクリープ曲線形状を評価する方法として有用と期待できる。

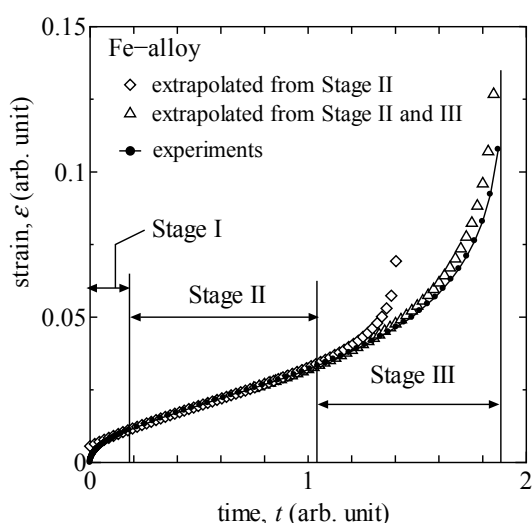


図2 ひずみ加速指数によって再構成したクリープ曲線の例; 遷移クリープを含むクリープ曲線を精度よく再現できる

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 6 件)

① Y. Enomoto, T. Nishimura, H. Sato and S.-I. Tanaka; “Distribution of residual stresses in 1070 single phase aluminum with grain size gradient formed by RBT treatment”; Materials Science Forum, 768-769 (2014), pp.343-350.

② H. Sato, Y. Enomoto, K. Omote, and S.-I. Tanaka; “Comparison of internal and residual stresses measured by strain-dip test and XRD during high temperature deformation of Al-Mg solid solutions”; Materials Science Forum, 768-769 (2014), pp.351-357

③ Hiroyuki Sato, Kosuke Omote, Akira Sato, and Kouki Ueno; “Extrapolation of Sigmoidal Creep Curve by Strain Acceleration Parameter”; Key Engineering

Materials Vols. 592-593 (2014) pp 606-609

④ Hiroyuki Sato, Kosuke Omote, and Akira Sato “Extrapolation of Creep Curve and Creep rate by Strain Acceleration Parameter in Al-Mg Solid Solutions”; Materials Science Forum Vols. 794-796 (2014), pp 307-312,

⑤ Kouki Ueno, Akira Sato and Hiroyuki Sato; “Formation of Microstructural Gradient of AA2017 by RBT at Ambient Temperature”; Materials Science Forum Vols. 794-796 (2014), pp 1233-1238

⑥ 佐藤麗, 表皓介, 前田悠太郎, 佐藤裕之; “ひずみ加速指数による Cu-Al 固溶体のクリープ曲線の区間評価”; 銅と銅合金, 53 巻, (2014), 111-116.

[学会発表] (計 33 件)

① 西村 太一, 榎本 祐二, 佐藤 裕之; RBT 処理による時効硬化アルミニウム合金の組織勾配の形成; 軽金属学会第 122 回春期大会; 九州大学; 2012.5.20.

② H. Sato, K. Otaka, Y. Enomoto, K. Omote; Analysis of Creep Curve by Strain Acceleration Parameter in Sinter of Ultrafine Particles Made from SUS304 by Arc Plasma Method; International Workshop on Bulk Nanostructured Metals; 京都大学; 2012.6

③ 表皓介, 佐藤裕之; ひずみ加速指数による一次および二次クリープ曲線の外挿法の検討; 高温強度と組織形成の材料科学研究会; 富山市; 2012.8.30-9.1

④ 榎本祐二, 吉崎慶, 佐藤裕之; 引張回転曲げ複合負荷により形成したアルミニウム合金の組織勾配とクリープ挙動; 高温強度と組織形成の材料科学研究会; 富山市; 2012.8.30-9.1

⑤ 榎本祐二, 西村太一, 吉崎慶, 佐藤裕之; RBT 処理によって組織勾配を形成した時効硬化アルミニウム合金のクリープ挙動; 日本金属学会秋期大会; 愛媛大学; 2012.9

⑥ 大高健, 榎本祐二, 表皓介, 佐藤 裕之; ひずみ加速指数による SUS ナノパウダー焼結体のクリープ曲線の評価; 日本金属学会 2012 年秋季大会; 愛媛大学; 2012.09.18

⑦ 太田宏生, 大高健, 吉崎 慶, 佐藤 裕之; ひずみ加速指数を用いた外挿クリープ曲線に及ぼすひずみ範囲の影響; 日本金属学会 2012 年秋季大会; 愛媛大学; 2012.09.18

⑧ Y. Enomoto, T. Nishimura, H. Sato, S.-I. Tanaka; Distribution of residual stresses in 1070 single phase aluminium with grain size gradient formed by RBT treatment; 9th International Conference on Residual Stress, (ICRS9); Congress Centre Garmisch-Partenkirchen, Germany; 2012.10.7-9.

⑨○H. Sato, Y. Enomoto, K. Omote, S.-I. Tanaka; Internal and Residual Stresses in High Temperature Deformation of Solid Solutions; International Conference on Residual Stress, (ICRS9); Congress Centre Garmisch-Partenkirchen, Germany; 2012.10.7-9

⑩○吉崎慶, 佐藤裕之; ひずみ加速指数による銅合金のクリープ曲線解析の試み; 第52回日本銅学会講演大会; 東京工業大学; 2012.11.3-4.

⑪○吉崎慶, 佐藤裕之; ひずみ加速指数によるCuAl 固溶体のクリープ曲線解析の試み; 第11回日本金属学会東北支部研究発表大会; 東北大学; 2012.12.13.

⑫○榎本祐二, 西村太一, 佐藤裕之, 田中俊一郎; RBTによって形成された組織勾配を持つA1070の残留応力分布; 東北大学; 第11回日本金属学会東北支部研究発表大会; 2012.12.13.

⑬佐藤裕之, 榎本祐二, ○表皓介, 田中俊一郎; Al-Mg 固溶体の内部応力と残留応力の比較; 第11回日本金属学会東北支部研究発表大会; 東北大学; 2012.12.13.

⑭○佐藤裕之, 吉崎慶; ひずみ加速指数による逆遷移型のクリープ曲線の定量評価とクリープ曲線の外挿; 日本金属学会春季大会; 東北大学; 2013.3

⑮○佐藤裕之; トワイマン効果を用いたバルクナノメタルの残留応力・ひずみの評価とその制御; H25年度バルクナノメタル第一回全体研究会; キャンパスプラザ京都; 2013.5.31

⑯○Hiroyuki Sato, Kosuke Omote, Akira Sato, and Kouki Ueno; Extrapolation of Sigmoidal Creep Curve by Strain Acceleration Parameter; Seventh International Conference on MATERIALS STRUCTURE & MICRO MECHANICS OF FRACTURE (MSMF7); Brno, Czech Republic; 2013.7.1-3

⑰○上野 功樹, 佐藤 麗, 佐藤裕之; RBTにより組織勾配を形成したAl合金の高温強度; 日本金属学会高温強度と組織形成の材料科学研究会; 宮城県刈田郡; 2013.8.29-31

⑱○佐藤 麗, 表 皓介, 佐藤裕之; ひずみ加速指数によるクリープ曲線の比較; 日本金属学会高温強度と組織形成の材料科学研究会; 宮城県刈田郡; 2013.8.29-31

⑲○佐藤裕之, 佐藤 麗, 表 皓介; ひずみ加速指数の評価によるクリープ曲線の新しい区間分類の提案; 日本金属学会 2013年秋期講演大会(第153回); 金沢大学; 2013.9.17-19

⑳○上野 功樹, 佐藤 麗, 佐藤裕之; RBT処理による2017合金の高温クリープ強度と室温強度の同時改善; 日本金属学会 2013年秋期講演大会(第153回); 金沢大学; 2013.9.17-19

㉑○佐藤裕之, 佐藤 麗; ひずみ加速指数によ

るクリープ曲線の区間評価; 日本銅学会第53回講演大会; 関西大学; 2013.10.15-17

㉒○Hiroyuki Sato, Kosuke Omote, Akira Sato, Kouki Ueno; Evaluation of strain rate change during creep in sinter of ultrafine particles made by arc plasma method; International conference on Processing & manufacturing of advanced materials (Processing, Fabrication, Properties, Application, THERMEC2013); Las Vegas, NV, USA; 2013.12.2-6 【Invited Presentation】

㉓○上野功樹, 佐藤裕之; アルミニウム合金のマクロ組織に及ぼすRBT処理の影響; 日本金属学会 2014年春期講演大会(第154回); 2014.3.21

㉔○佐藤裕之, 表皓介, 上野功樹, 佐藤麗; ひずみ加速指数によるクリープ曲線の定量評価とクリープ曲線の外挿法の提案; 日本金属学会 2014年春期講演大会(第154回) (シンポジウム, 低炭素化社会の構築に向けた耐熱材料の新展開 III); 2014.3.22

㉕○佐藤麗, 佐藤裕之; 遷移クリープが明瞭に現れるクリープ曲線の外挿方法の比較; 日本金属学会 2014年春期講演大会(第154回); 2014.3.23

㉖○上野功樹, 佐藤麗, 佐藤裕之; Formation of Microstructural Gradient of A2017 by RBT at Ambient Temperature; 第14回アルミニウム合金に関する国際会議 (ICAA14, ノルウェー); 2014.6.17

㉗○佐藤裕之, 表皓介, 佐藤麗; Extrapolation of Creep Curve and Creep rate by Strain Acceleration Parameter in Al-Mg Solid Solution Alloys; 第14回アルミニウム合金に関する国際会議 (ICAA14, ノルウェー); 2014.6.19

㉘○佐藤麗, 佐藤裕之, 田中俊一郎; 2D-XRD法によるバルクナノメタルの残留応力テンソルの評価; 日本金属学会 2014年秋期講演大会(第155回); 2014.9.24

㉙○前田悠太郎, 上野功樹, 佐藤麗, 佐藤裕之; RBTによって形成した組織勾配を持つA2017のクリープ曲線の定量評価; 日本金属学会 2014年秋期講演大会(第155回); 2014.9.26

㉚○佐藤裕之; バルクナノメタルの残留応力—新しい構造材料への期待—; 日本金属学会 2014年秋期講演大会 (シンポジウム, バルクナノメタル IV); 2014.9.26 【基調講演】

㉛○Shun-Ichiro TANAKA; "Measured Stress/Strain in a Localized Area Relating to Materials Properties"; 7th French Research Organizations-Tohoku University Joint Workshop on Frontier Materials (Frontier2014, ニース, フランス) 2014.12.7-11)

㉜○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; 仙台市; 2015.5.17
㊦ 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); 2015.5.31~6.4(トゥールーズ,
フランス)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)
名称: 超微細粉末, 高強度鋼焼結体及びそれ
らの製造方法
発明者: 佐藤 裕之
権利者: (国) 弘前大学, カミテック (株)
種類: 特許
番号: 特願 2012-248440
出願年月日: 2012.11.12
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

該当なし

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

(2) 研究分担者

田中 俊一郎 (TANAKA, Shun-Ichiro)
東北大学・多元物質科学研究所・教授
研究者番号: 00345943

(3) 連携研究者

該当なし