

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420693

研究課題名(和文) 延性二相合金における重層的な強化機構と高温変形律速機構の解明

研究課題名(英文) Strengthening and deformation rate-controlling mechanism of an alloy consisting of dual ductile phases at high temperatures

研究代表者

藤原 雅美 (FUJIWARA, Masami)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：40156930

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：延性二相合金と各単相合金の高温変形が、押し込み試験法と計算モデルを使って調べられている。実験結果は、単相合金に関するクリープ速度と押し込み圧力の両対数プロットは直線上に乗ることを示す。その勾配はクリープの応力指数に対応し、各々 n_1 と n_2 である。一方、二相合金の全てのデータは単相合金のデータの間におり、それらは直線上に存在しない。二相合金の応力指数 n は、クリープ速度の増大と共に n_1 から n_2 に変化する。計算結果は、その n 値が各相の値だけでなく負荷条件にも依存することを示す。クリープ速度が k かなり遅いとき、硬い相が荷重の大部分を担うため、硬い相のクリープ機構が二相合金のクリープ挙動に強い影響を与える。

研究成果の概要(英文)：The high-temperature deformation of the ductile two-phase alloy and the respective single-phase alloys are investigated using indentation testing technique and a computational model. Experimental results show that double logarithmic plots of the creep rate and the indentation pressure for the single-phase alloy fall on a straight line. The slope corresponds to the stress exponent for creep, n_1 and n_2 , respectively. On the other hand, all the data for the two-phase alloy lie between those for the single-phase alloys, but they are not on a straight line. The stress exponent n of the two-phase alloy changes from n_1 to n_2 with increasing the creep rate. Computational results show that the n value of the alloy depends on not only those of the respective phases, but also the load condition. When the creep rate is very low, the hard phase is responsible for the majority of the load, and the creep mechanism of the hard phase has a strong influence on the creep behavior of the two-phase alloy.

研究分野：材料強度物性学

キーワード：延性二相合金 計装化押し込み試験 クリープ特性値 クリープ構成式 FEシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

最近の耐熱軽量構造材料に関する研究動向を見ると、初晶をラメラ共晶組織で取り囲むか、あるいは多結晶体中に熱間押出加工によって繊維状の長周期積層型規則構造相を整列分散させることによりクリープ強度の向上を企図していることが分かる。こうした延性二相合金では母相と強化相が異なる変形律速機構でクリープしている可能性が高いのにも関わらず、試験データを従来の単相合金または粒子強化合金のクリープ理論で解釈している研究報告を散見する。例えば、このときの応力指数や活性化エネルギーは二つの構成相のクリープ変形が互いに影響を及ぼし合った結果と解釈するのが当然であろう。また、この合金中の何処で生じる変形が全体を律速するのも不明なままである。これまでも二相合金のクリープ変形に関する優れた解説論文はあるが、構成相の応力指数をすべて同じと仮定したり、あるいは強化相が弾性変形する場合だけに限定して議論しており、本研究課題の延性二相合金を主な対象として扱ったものはない。

2. 研究の目的

二相 ($\alpha+\beta$) 合金における母相 α と強化相 β が高温になるとクリープ変形するとき、このような延性二相合金 (Ductile dual-phase alloy, D2PA) と各構成相 (α, β) のクリープ特性値 (応力指数, 活性化エネルギー, 粒径指数など) を関係づける理論式の導出を試みた研究論文は、筆者の調べた限り皆無である。本研究課題は、先の基盤研究C「一般計装化押し込み試験とモデリングによるクリープ構成式の予測」(主な研究成果: 押し込み試験とモデリングによるベキ乗則材料の単軸クリープに関する構成式の予測, 日本金属学会誌, 76(2012), 597-606.) の内容を、単相合金から多相合金にまで発展させたものである。延性二相合金のクリープ変形を重層的な強化原理と変形律速機構に基づいてモデリングし、この種の合金のクリープ特性値に明確な解釈を与えることは、学術的に重要なだけでなく、次世代耐熱軽量構造材料などの開発にも役立つことが期待できる。

3. 研究の方法

二相合金と各構成相がベキ乗則に従ってクリープ変形し、全体が同じひずみ速度で変形するように適合則が成り立ち、それが実現するように外力が内部で配分される複合則に従う二相等ひずみ速度変形 (Dual-phase isostrain rate deformation, DPISRaD) モデルを組み立て、二相合金と各構成相のクリープ特性値を関係づける理論式を導出する。また、FE シミュレーション (M. Fujiwara et al.,: Analysis on pseudo-steady indentation creep, Acta Mech. Sol. Sinica, 21(2008), 283-288.の内容を発展) によって、延性二相合金の押し込みクリープ変形の様子を調べ、DPISRaD モデル

から予見される内容を詳細に検討する。材料試験には、当研究室で開発した計装化押し込みクリープ試験機 (アルバック理工 (株) 製, 特許 4096034 号 / 発明者: 藤原雅美) を用いる。この試験法の詳細は、科学雑誌: 金属「特集 計装化押し込み試験法の最前線」藤原雅美編集, アグネ技術センター, 78(2008), 3-37. でも知ることができる。次いで、この解析方法を次世代耐熱軽量構造材料 (モデル材料; Mg₉₇-Zn₁-Y₂ 合金押し出材) に適用し、微細 α 相 (母相) と β 相 (長周期積層型規則構造相, LPSO 相) からなる延性二相合金の重層的な強化原理と高温変形律速機構について、連続体力学と転位論によるマクロ/ミクロスケールの視点に立った解明を試みる。具体的には、(1) 延性二相合金のクリープ特性値に影響を及ぼす構造因子を明らかにする。(2) 変形速度が早くなるにつれて、この合金の高温変形律速支配領域が強化相から母相に移行することを理論と実験により示す。(3) 次世代の耐熱軽量構造材料として注目される Mg 基二相 ($\alpha + \text{LPSO}$) 合金について、押し込みクリープ試験と FE シミュレーションを行い、この合金の重層的な強化機構と高温変形律速機構を明らかにする。

4. 研究成果

モデル材料として、次世代 Mg 合金として有望視されている Mg₉₇-Zn₁-Y₂ (mol%) 合金押し出材を採用する。この延性二相合金では、軟らかい母相である α -Mg 相 (体積率 75%) 中に硬い板状の強化相の LPSO 相 (同 25%) が押し出方向に沿ってラメラ状に配向している。計装化押し込み試験法により各単相合金と二相合金のクリープ特性値 (応力指数と活性化エネルギー) を測定したところ、各単相合金の値は変形速度を変えても一定のままであったが、二相合金のクリープ特性値は変形速度が遅いときほど LPSO 単相合金の値に近づき、変形速度が速いときは α -Mg 単相合金の値に近づくことが判明した。延性二相合金のクリープに関する構成式は、(1) 各相の変形はベキ乗則に従うこと (2) 荷重分担については複合則が成り立つこと (3) 両相において変形の連続性: 適合則が成り立つことを前提に導出されている。これに基づく理論式から、延性二相合金のクリープ特性値は、各単相合金の中間の値をとり、変形速度だけでなく強化相の不連続性にも影響を受けることが明らかにされた。FE シミュレーションから、高温下でゆっくり変形するときは強化相の荷重分担率が高まるため LPSO 相の変形挙動が二相合金全体のクリープ挙動に大きく影響を及ぼし、また高温下で速く変形するときは母相の荷重分担率の方が高まるため α -Mg 相が全体のクリープ挙動を支配するようになることが示された。また、強化相が不連続分布して強化相同士に大きな隔りがあるような場合、上記 (3) が成り立たなくなるため、FE 結果は理論式から導かれるクリープ

特性値と大きく異なることが示された。また FE 結果は、強化相の間隔がある程度狭いと強化相間に介在する母相に発生する応力が低いためその領域はほとんど変形しないため、見かけ上、強化相が連続分布しているのと同様に見做せる「ブリッジ効果」が発現することが示された。実験から得られた延性二相合金のクリープ特性値と上記の理論式から予見される値とがよく一致することは、二相合金中において板状の LPSO 相が近距離で並列して存在するため、ブリッジ効果が生じていたためと考えられる。

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 5 件)

H. Takagi and M. Fujiwara: Deformation behavior immediately after indentation load change in ultrafine-grained Al-Mg solid solution alloys, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(2016), 2230-2235..

藤原雅美: 計装化押込み試験法によって結晶性材料のクリープ挙動を予測する, *金属*, 85 (2015), 603-611.

H. Takagi and M. Fujiwara: Set of conversion coefficients for extracting uniaxial creep data from pseudo-steady indentation creep test results, *Materials Science and Engineering A*, 602(2014), 98-104.

H. Takagi, M. Dao and M. Fujiwara: Prediction of the constitutive equation for uniaxial creep of a power-law material through instrumented microindentation testing and modeling, *Materials Transactions*, 56(2014), 275-284.

Y. Zhang, H. Zhu, M. Fujiwara, J. Xu and M. Dao: Low-temperature creep of SnPb and SnAgCu solder alloys and reliability prediction in electronic packaging modules, *Scripta Materialia*, 68(2013), 607-610.

[学会発表](計 23 件)

高木秀有, 板橋怜史, 藤原雅美: マグネシウム基 LPSO 合金押出材における押込み荷重急増直後の塑性変形挙動, 軽金属学会春期大会(大阪大学), 2016/5.

石井康雄, 板橋怜史, 高木秀有, 藤原雅美: 計装化押込み試験法による純マグネシウムの高温クリープ特性評価, 軽金属学会春期大会(大阪大学), 2016/5.

板橋怜史, 藤原雅美, 高木秀有: マグネシウム基 LPSO 合金押出材における荷重急増直後の塑性変形挙動, 日本金属学会春期

大会(東京理科大学), 2016/3.

高木秀有, 板橋怜史, 藤原雅美: マグネシウム基 LPSO 合金押出材における押込み荷重急減・急増直後の変形挙動, 軽金属学会秋期大会(日本大学), 2015/11.

K. Higashida, T. Morikawa and M. Fujiwara: Deformation behaviors and strengthening mechanism on a Mg-based synchronized LPSO structure, The 10th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications (Jeju, Korea), 2015/10.

板橋怜史, 藤原雅美, 高木秀有: 押込み荷重急変試験による Mg 基 18R-LPSO 相の高温クリープ特性評価, 日本金属学会秋期講演大会(九州大学), 2015/9.

H. Takagi and M. Fujiwara: Deformation behavior immediately after indentation load change in ultrafine-grained Al-Mg solid-solution alloys, 17th International Conference on the Strength of Materials (Brno), 2015/8.

K. Higashida, T. Morikawa and M. Fujiwara: Inhomogeneities in deformation microstructures in metals, Russian-Japanese Workshop on the structure and mechanisms of plasticity of advanced magnesium alloys and related materials (Togliatti and St. Petersburg), 2015/6.

板橋怜史, 藤原雅美, 高木秀有: 押込み荷重急変試験による Mg 基 LPSO 合金押出材のクリープ特性評価, 軽金属学会春期大会(東北大学), 2015/5.

板橋怜史, 藤原雅美, 高木秀有: 押込み荷重急変試験による Mg₈₈-Zn₅-Y₇ 合金押出材の有効応力と回復速度の評価, 日本金属学会春期大会(東京大学), 2015/3.

齋藤康平, 藤原雅美, 高木秀有, 白井健二: 延性二相組織におけるクリープ構成方程式の導出とその適用限界に関する FE 解析, 精密工学会春季大会(東洋大学), 2015/3.

板橋怜史, 藤原雅美, 高木秀有: マグネシウム基 LPSO 合金押出材における押込み荷重急増直後のクリープ挙動, 軽金属学会秋期大会(東京工業大学), 2014/11.

H. Takagi and M. Fujiwara: High-temperature Creep Deformation Mechanism of Mg₈₈-Zn₅-Y₇ (mol%) extruded alloy, The 2nd International Symposium on Long-Period Stacking Ordered Structure and Its Related Materials (Kumamoto), 2014/10.

高木秀有, 板橋怜史, 藤原雅美: Mg₈₈-Zn₅-Y₇ 合金押出材の押込み荷重急減

試験による有効応力評価,日本金属学会秋
期大会(名古屋大学), 2014/9.

齋藤康平,高木秀有,藤原雅美,小林義和,
白井健二:延性二相組織のクリープ特性に
及ぼす強化相の分布状態と変形速度の影
響に関する FE 解析,精密工学会秋季大会
(鳥取大学), 2014/9.

高木秀有,渡邊貴久,板橋怜史,藤原雅美:
キंकバンドを有する $Mg_{88}Zn_5Y_7$ 合金押
出材の荷重急変試験による内部応力評価,
軽金属学会春期大会(広島大学), 2014/5.

高木秀有,山梨直紀,藤原雅美:微細結晶
粒 Al-Mg 固溶体合金における荷重急変後
の押し込み変形挙動,日本金属学会春期大会
(東京工業大学), 2014/3.

齋藤康平,藤原雅美,高木秀有,小林義和,
白井健二:延性二相組織の高温変形に及ぼ
す強化相の影響に関する FE 解析,精密工
学会東北支部学術講演会(秋田県たざわこ
芸術村), 2013/12.

山梨直紀,高木秀有,藤原雅美:微細結晶
粒 Al-Mg 固溶体における荷重急変後の押
込みクリープ挙動,軽金属学会秋期大会
(横浜国立大学), 2013/11.

渡邊貴久,藤原雅美,高木秀有:シンクロ
型 LPSO 構造を有する Mg-Zn-Y 合金のク
リープ強さに及ぼすキंकバンドの影響,
軽金属学会秋期大会(横浜国立大学),
2013/11.

- 21 渡邊貴久,藤原雅美,高木秀有:シンクロ
型 LPSO 構造 Mg 合金におけるキंकバン
ドスペーシングと強度の関係,日本金属学
会秋期大会(金沢大学), 2013.9.
- 22 山梨直紀,高木秀有,藤原雅美:微細結晶
粒 Al-Mg 固溶体における押し込み荷重急
減後の変形挙動,日本金属学会秋期大会
(金沢大学), 2013.9.
- 23 渡邊貴久,藤原雅美,高木秀有,東田賢二,
河村能人:Mg-Zn-Y 延性二相合金のク
リープ特性値に関する理論とモデリングに
よる検討,軽金属学会春期大会(富山大学),
2013/5.

〔図書〕(計1件)

丸山公一,藤原雅美,吉見享祐:基礎から
学ぶ構造金属材料学,内田老鶴圃,2014/10,
203 頁中 61 頁を担当.

〔その他〕

ホームページ等

<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/46/0004555/profile.html>

<http://www.ge.ce.nihon-u.ac.jp/~fujiwara/outcome>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原雅美 (FUJIWARA, Masami)
日本大学・工学部・教授
研究者番号: 40156930

(2) 連携研究者

高木秀有 (TAKAGI, Hidenari)
日本大学・工学部・専任講師
研究者番号: 40409040

以上