

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月29日現在

機関番号：35409

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560104

研究課題名（和文） 統合型変態・熱塑性構成式の一般化と材料パラメータの同定および変態・熱・力学解析

研究課題名（英文） Generalization of unified transformation-plasticity constitutive equation with identified material parameters and the application to metallo-thermo-mechanical simulation.

研究代表者

井上 達雄 (Tatsuo Inoue)

福山大学・構造・材料開発研究センター・客員教授

研究者番号：10025950

研究成果の概要（和文）：変態塑性特性、具体的には変態塑性係数の同定には、煩雑な労力を要する実験に頼らざるを得ない現状から、本研究では、解析的、数値的にこれを決定することを目的とした。すなわち、母相と新相が平行に結合された2本棒モデルを用いて解析を行ったが、これによると両相の熱膨張率の違いから、変態過程では母相には引張、新相には圧縮応力が生じる。これに降伏応力以下であっても小さな外部負荷がかかると、母相では容易に降伏点に達し、塑性変形が生じることになる。ここで重要なのは、両相における温度依存の力学的、熱物性的特性であって、これが変態の進行によって変化する様子を把握しておく必要がある。このようにして生じる塑性変形を負荷応力で除したものが変態塑性係数であるから、この値は容易に決定できる。同定した結果は実験結果と良い相関をもつことがわかった。またこの結果を用いて、変態・熱・力学シミュレーションを行ったところ、応力、組織分布は妥当な結果となった。

研究成果の概要（英文）：The project motivates to propose a model of evaluating the transformation plasticity, TP, coefficient by numerical calculation since identification of the coefficient so far needs complicated and time consuming experiments. A parallelly connected two bar model consisted of mother and new phases is proposed: Tensile stress occurs in mother phase with larger thermal expansion coefficient in the course of cooling phase transformation, while compressive stress takes place in new phase with smaller coefficient in new phase. A tensile external stress even lower than yield stress is accelerated by the initial tensile stress in mother phase easily reaches yielding followed by plastic deformation. Simple thermo-elastic-plastic theory is employed to numerically calculate the rate and the current value of stress and strain in both phases depending on the amount of externally applied stress by use of material parameters for stress-strain relation and phase transformation kinetics characterized to material focused. Deviation of induced strain subjected to external stress from that of zero stress is now regarded as TP strain, and the TP coefficient is obtained by the TP strain divided by the external stress.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：材料力学、相変態、変態・熱・力学、統合型変態・熱塑性構成式、材料パラメータ

1. 研究開始当初の背景

相変態を伴う過程では、降伏応力以下の小さな負荷応力によっても塑性変形が生じる。これを変態塑性 (transformation plasticity ; または変態超塑性、transformation super plasticity) という。したがって、この過程における変態・熱・力学シミュレーション¹⁾を行う際には、弾性ひずみ ε^e 、通常の塑性ひずみ ε^{np} 、熱ひずみ ε^t 、変態ひずみ ε^m に加えて、この変態塑性ひずみ ε^{sp} を考慮したシミュレーションを行う必要がある。この変態塑性ひずみの大きさは、他のひずみに比べて極めて大きな値となることがわかる。

ところで、この変態塑性ひずみがどの程度生じるか (具体的には、変態塑性係数 K の大きさ)を知るには、温度が変動する変態過程における応力に依存する微小なひずみの測定をせねばならず、煩雑な実験が必要となる。これについては当研究代表者をはじめ多くの研究者が実験を行っており、その一部は、本学会塑性工学部門委員会の材料データベース MATEQ-Ver. 3 にも収録されているが、鋼種が限られているのが現状である。

2. 研究の目的

ここでは、簡単なモデルを設定して、解析的に変態塑性係数を求める方法を提示し、実験結果との比較を行い、解析結果の妥当性の検証を行うことにする。また、そのミクロな観点からの意義づけのために、フェーズフィールドシミュレーションと対比を行うとともに、得られた変態塑性係数のデータが実際の変態・熱・力学シミュレーションに及ぼす効果についての検証を行う。

3. 研究の方法

(1) 2本棒モデルの構築と変態塑性係数の同定

① 母相、新相の力学的・熱物性的特性の把握とその数値化

② パーライト変態およびマルテンサイト変態過程におけるシミュレーションのよる同定

③ 同定した変態塑性係数の実験との比較検討

(2) 変態塑性現象のフェーズフィールドシミュレーションによるミクロな検討

(3) 同定した変態塑性係数を用いた変態・熱・力学シミュレーションとその効果の検討

4. 研究成果

全体として取組み得られた成果は大きく分けて以下のとおりである。

(1) 変態塑性発現モデルの統合型変態・熱・力学理論による構成式の一般化と変態塑性特性の解析的導出

① 降伏関数の引数である塑性特性に、変態の進行の効果を考慮して一般化変態塑性特性を具体的に表現する理論的な導出を行った。

② 変態塑性は変態中の母相と新相の線膨張係数、塑性特性の相違に依存することを考慮して、変態中の温度、変態のカイネティックス、および弾塑性解析を行うことによって、負荷の有無による塑性ひずみを計算し、これから変態塑性係数の解析的導出の基礎的検討を行った。これによって、引張と圧縮負荷での変態塑性係数の違いなどについて多くの知見を得た。

③ 巨視的なモデルを確立するために、すでに上原らが確立した力学場を含むフェーズフィールド法によって、変態の進行と応力の関係を検討した。

(2) 態塑性特性データの実験的採取とデータベース化

① これまで変態塑性特性を同定した材料に加えて、高張力鋼など各種の材料についてデータを採取した。

② とくに、パーライト、ベイナイト変態に加えて、マルテンサイト変態も対象とした。

③ これらの取得したデータを井上、岡村らが構築した材料データベース MATEQ に移植するとともに、炭素当量を規定し、化学成分依存性を検討した。

(3) 変態・熱・力学シミュレーションへの適用と効果の検討

すでに井上、巨が開発した変態・熱・力学シミュレーションソフト COSMAP への導入を容易にし、変態塑性の効果と重要性を明らかにした。また、熱間プレスへこの手法を適用して、自動車用高張力鋼のプレス成形および高周波焼入れの残留応力などの評価の向上に寄与した。

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 13 件)

① 井上達雄、岸本飛鳥、曲げ加工した平板の焼入れ過程のシミュレーションとそれに及ぼす変態塑性効果、熱処理、査読

- 有、51 卷、2011、pp.224-232
- ② Tatsuo Inoue, Mechanics and Characteristics of Transformation Plasticity and Metallo-thermo-mechanical Process Simulation, *Procedia Engineering*, 査読有, Vol.10, 2011, pp.1 223-228
- ③ Tatsuo Inoue, Unified theory of transformation plasticity and the effect on quenching simulation, *Strojarstvo*, 査読有, Vol.53, 2011, pp.11-18
- ④ Xiujian Zhao, Junwen Wang, Chunhuan Chen, Yuan Sun, Ruiming Ren, Dong ying Ju, Comparable study on water cavitation peening and traditional shot peening of Almen strips, *Advanced Materials Research*, 査読有, Vol.154-155, 2011, pp.1446-1449
- ⑤ S. Ishiguro, D.Y. Ju, R. Ogatsu and T. Nakano, Study on Micro-structure and Morphological Evolution of Fe/Pt Nano-Magnetic Film, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 査読有, Vol.11, 2011, pp.1-5
- ⑥ D.Y. Ju, P. Bian, T. Kumazawa, M. Nakano, H. Matsuura, K. Umetani, T. Komdo, Y. Uozumi, K. Makino, N. Noda, K. Koide, M. Akutsu and K. Masuyama, Drug Delivery Observation of Hydrophobe Ferrofluid and Magnetite Nanoparticles by SPring-8 Synchrotron Radiation, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 査読有, Vol.11, 2011 pp.6-11
- ⑦ Dong-Ying Ju, Ryuji Mukai and Takao Sakamaki, Development and Application of Computer Simulation Code COSMAP on Induction Heat Treatment Process, 査読有, Vol.5, 2011, pp 65-68
- ⑧ Xiaodong Hu, Dong ying Ju and Hongyang Zhao, Thermal Flow Simulation of Twin Roll Casting Magnesium Alloy Sheet, *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 査読無, Vol.51, 2011, pp.
- ⑨ Z. Yu, D. Y. Ju, H. Y. Zhao and X. D. Hu, Effect of Zn-In-Sn Elements on the electric properties of magnesium alloy anode materials, *Journal of Environmental Sciences*, 査読有, Vol.23, 2011, pp.95-99
- ⑩ Satoshi Kishida, Dong-Ying Ju and Hong He, Influence of coating method catalyst activity of AgCl/Al2O3/SUS304 composite plate, *Journal of Environmental Sciences*, 査読有, Vol.23, 2011 pp. 84-99
- ⑪ Takuya Uehara, Computer Simulation of Microscopic Stress Distribution in Complex Microstructure Using a Phase Field Model, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 査読有, Vol.16, 2011, pp. 291-295
- ⑫ Takuya Uehara, A phase field modelling for multi-scale deformation mechanics of polycrystalline metals, *Procedia Engineering*, 査読有, Vol.10, 2011, pp. 1779-1784
- ⑬ Takuya Uehara, An Approach for Modeling Transformation Plasticity Using a Phase Field Model, *Advanced Materials Research*, 査読有, Vol.320, 2011 pp.285-290
- [学会発表] (計8件)
- ① 井上達雄、変態塑性特性の解析的同定と検証、日本機械学会第24回計算力学講演会、2011年10月9日、岡山
- ② 上原拓也、微視組織内の応力分布と材料特性変化に関するフェーズフィールドモデリング、日本機械学会第24回計算力学講演会、2011年10月9日、岡山
- ③ 井上達雄、変態塑性係数の解析的算出の試み、日本材料学会第60期学術講演会、2011年5月26日、大阪
- ④ 上原拓也、船山貴主、フェーズフィールドモデルによる結晶粒成長と応力の影響に関するシミュレーション、日本材料学会第60期学術講演会、2011年5月26日、大阪
- ⑤ Tatsuo Inoue, Mechanics and Characteristics of Transformation Plasticity and Metallo-thermo-mechanical Process Simulation, The 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, 2011年5月8日, Como, Italy
- ⑥ Dong-Ying Ju, Microstructure evaluation and crack initiation crack for AZ31 sheet under biaxial stress, The 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, 2011年5月8日, Como, Italy
- ⑦ Dong-Ying Ju, Stress distribution and crack propagation under biaxial lowcyclic loading, The 11th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, 2011年5月8日, Como, Italy
- ⑧ Takuya Uehara, A Phase Field Modelling

for Multi-scale Deformation Mechanics
of Polycrystalline Metals, The 11th
International Conference on the
Mechanical Behavior of Materials,
2011年5月8日, Como, Italy

[その他]

ホームページ等

井上 達雄 ;

<http://www.fukuyama-u.ac.jp/gakubu/mecha/staff/inoue/index.htm>

巨 東英 ;

<http://www.sit.ac.jp/user/ju/home/index.htm>

上原 拓也 ;

http://uhlab.yz.yamagata-u.ac.jp/index_j.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 達雄 (Tatsuo Inoue)

福山大学・構造・材料開発研究センター・
客員教授

研究者番号 : 10025950

(2) 研究分担者

巨 東英 (Dong-Ying Ju)

埼玉工業大学・工学部・教授

研究者番号 : 10255143

上原 拓也 (Takuya Uehara)

山形大学・理工学研究科・准教授

研究者番号 : 50311744

(3) 連携研究者

該当なし